

Disseny d'un sistema propulsiu híbrid dièsel-elèctric per a un creuer de luxe

Treball Final de Grau



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:
Aleix Tarafa Aymerich

Dirigit per:
Inmaculada Ortigosa Barragán

Grau en Enginyeria en Sistemes i Tecnologia Naval

Barcelona, 1 de juny del 2020

Departament de Ciència i Enginyeria Nàutica



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona

Agraïments

En aquest apartat vull agrair a totes aquelles persones que m'han ajudat a dur a terme la realització d'aquest treball tant en coneixements com moralment. No ha sigut fàcil l'adquisició de tota aquella informació que m'han permès desenvolupar el treball i és per això que estic especialment agraït a aquelles persones que m'han pogut ajudar.

Principalment vull agrair a Javier Rioja que des de l'empresa Ingeteam m'ha subministrat molts coneixements que desconeixia totalment, m'ha estat guiant per dur a terme el disseny i m'ha proporcionat molta informació importantíssima per aquest treball.

També m'ha ajudat molt un dels autors del disseny del creuer de luxe, Jorge Vicario, que m'ha proporcionat tota aquella informació necessària referent al vaixell.

A Marcos Lapaz de l'empresa ABB li agraeixo tota la informació que m'ha proporcionat sobre les diferències entre els sistemes híbrids.

Estic, també, molt agraït als professors Víctor Fuses i Joel Jurado que m'han ajudat en les parts elèctrica i propulsiva respectivament, aspectes fonamentals per a la realització del treball.

A la meva tutora Inmaculada Ortigosa li agraeixo que m'hagi estat guiant des de el principi fins al final i corregint-me tots aquells aspectes necessaris.

Finalment i no menys important, vull agrair a la meva família el seu suport moral durant tots aquests anys i especialment li dedico aquest treball al meu avi que ha sigut el meu referent des de ben petit.

Introducció

Actualment vivim en un món on l'estudi i la integració de tot tipus de sistemes que permeten una reducció de la contaminació atmosfèrica és molt important. Ciutats com Barcelona pateixen concentracions excessives de CO₂ de les quals el 20% són provinents del port, aeroport i les indústries pròximes.

En el 2017 el port de Barcelona va emetre 5.332.522 tones de CO₂ provinents de tots aquells vaixells que al entrar, sortir i estar a port, consumeixen combustible. Els creuers, a l'igual que els mercants i els ferris, són els culpables de totes aquestes tones emeses de CO₂ tant al port de Barcelona com a molts altres ports d'arreu del món. És per això que, cada cop més, s'estan regulant les emissions de CO₂ i de NO_x per part de les institucions públiques.

Barcelona vol establir una fiscalitat ambiental que penalitzi els vaixells més contaminants perquè les navilieres apostin per l'ús de combustibles nets. A més, hi ha un pla d'electrificació dels molls perquè els vaixells puguin seguir operant sense consumir combustible mentre estan atracats.

A conseqüència de les regulacions d'emissions i, sobretot, de la contaminació atmosfèrica que estem patint a les grans ciutats, moltes empreses del sector naval estan començant a dissenyar sistemes propulsius híbrids que, a l'igual que en el sector automobilístic, es basen en la combinació de l'electricitat acumulada en bateries i l'ús de motors que cada cop consumeixen menys combustible.

Aquests sistemes híbrids serveixen per no consumir combustible durant les entrades, sortides i estàncies a port, gràcies a l'acumulació d'electricitat per part de bateries, provinent de l'energia residual generada pels generadors de a bord. Els consums dels vaixells, en especial els creuers, són molt irregulars, cosa que implica la generació irregular d'electricitat. Aquest fet suposa la disminució del rendiment de la planta propulsora que canvia completament en quan s'utilitzen bateries per emmagatzemar l'energia que no s'utilitza.

És per això que, en aquest treball, s'han volgut estudiar el funcionament d'aquests tipus de sistemes propulsors i fins a quin punt són possibles d'implementar en vaixells convencionals com són els creuers.

En aquest treball s'ha dissenyat un sistema propulsiu híbrid per a un petit creuer de luxe que combina les bateries elèctriques amb els generadors d'electricitat compostos per motors de combustió i alternadors elèctrics. El principal objectiu és el consum zero de combustible durant l'entrada, sortida i estància a port i un alt rendiment durant la navegació.

Primerament s'han estudiat tots els sistemes híbrids que existeixen en el sector naval, donant principal importància els que combinen l'electricitat i el combustible. A més, es mostraran diferents exemples de vaixells de passatge que disposen d'un sistema propulsiu híbrid que els permet navegar, segons quins règims de navegació, sense l'ús del combustible.

Seguidament s'han calculat totes les necessitats propulsives i energètiques del creuer de luxe en qüestió. Aquest creuer és un projecte desenvolupat per dos estudiants de la UPM de Madrid al 2003. És un petit creuer de luxe destinat a persones amb gran poder adquisitiu on l'eficiència energètica no era un dels objectius del projecte.

S'ha pogut obtenir tota la informació necessària referent al disseny del vaixell com són els plànols, les formes, les característiques de la planta propulsora i el balanç elèctric de tot el vaixell, entre d'altres.

Un cop s'ha tingut tota la informació necessària per dissenyar i dimensionar la nova planta propulsora del vaixell, s'han observat i resumit tots aquells apartats de la normativa, procedent de la societat de classificació DNV-GL, necessaris per a un disseny real d'un sistema d'aquestes característiques.

A partir d'aquí s'ha començat el disseny i el dimensionament del sistema propulsor seleccionant tota la maquinaria necessària i com s'havia de distribuir. S'han estudiat les diferents possibilitats de disseny i s'han seleccionat aquelles que millor s'adapten a les característiques del vaixell en qüestió.

A continuació s'ha redimensionat el sistema de combustible ja que els nous consums de fuel oil per part de la nova planta propulsora són significativament inferiors. S'han modificat els volums dels tancs de combustible i el caudal de les bombes.

Un cop dissenyats i dimensionats el sistema propulsor i el sistema de combustible, els elements d'aquests, s'han distribuït per les cobertes 1 i 2 del vaixell respectant l'estabilitat d'aquest i la normativa de la societat de classificació, DNV-GL.

Per acabar el treball, s'han calculat els costos i les emissions del nou sistema propulsor comparant-los amb l'anterior disseny i, en el cas de les emissions, també amb altres vaixells de passatge de característiques similars.

Índex

Agraïments	1
Introducció	2
Índex d'il·lustracions	8
Índex de gràfiques	9
Índex de taules	10
Capítol 1. Breu estudi sobre l'ús de la propulsió híbrida en l'entorn naval actual i quins són els sistemes més utilitzats	11
1.1 Ús de la propulsió híbrida actualment	11
1.1.1 MS Color Hybrid	12
1.1.2 MS Roald Amundsen	12
1.2 Sistemes híbrids de propulsió elèctrica.....	13
1.2.1 Sistema COEOD	13
1.2.2 Sistema COEOG	18
1.2.3 Sistema CODLAG	19
1.2.4 Sistema COEOS.....	20
1.2.5 Sistema COGES	21
1.2.6 Sistema Dièsel-Elèctric	22
Capítol 2. Estudi previ de les rutes de navegació i les necessitats propulsives	26
2.1 Característiques del creuer projecte.....	26
2.2 Creuers de luxe semblants i rutes més comuns pel mar mediterrani	27
2.2.1 Star Pride	27
2.2.2 Le Lyrial.....	30
2.2.3 Conclusions	32
2.3 Necessitats propulsives	32
2.3.1 Dades inicials.....	32
2.3.2 Resistència a l'avanç i la potència per a cada velocitat	33
2.3.3 Càlculs.....	34
Capítol 3. Resum de la normativa a tenir en compte.....	38
3.1 Propulsió elèctrica.....	38
3.2 Sistemes i equipaments	43
3.3 Disseny del sistema	44
3.4 Instal·lacions de bateries de ió de liti.....	52

Capítol 4. Estudi del sistema propulsiu més apropiat i el seu dimensionament	54
4.1 Comparació dels sistemes propulsius	54
4.2 Conclusions sobre el tipus de sistema a utilitzar	55
4.3 Tipus de xarxa elèctrica	56
4.3.1 Corrent alterna	56
4.3.2 Corrent continua	57
4.4 Conclusions sobre el tipus de xarxa elèctrica a utilitzar	58
4.5 Esquema primari unifilar del sistema.....	59
4.6 Consideracions de la normativa	60
4.6.1 Motors elèctrics	60
4.6.2 Convertidors de freqüència.....	60
4.6.3 Generadors principals i d'emergència	61
4.6.4 Quadres de distribució	61
4.6.5 Bateries	62
4.6.6 Transformadors.....	62
4.7 Selecció dels motors propulsius	62
4.7.1 Càlcul de la corba par-velocitat del motor seleccionat.....	64
4.8 Càlcul de la reductora.....	66
4.9 Selecció dels motors de proa	67
4.10 Selecció dels convertidors de freqüència pels motors.....	68
4.10.1 Motors principals	68
4.10.2 Càlculs de les freqüències i intensitats per a cada velocitat	69
4.10.3 Motors de proa	71
4.11 Selecció dels generadors i bateries.....	72
4.11.1 Balanç elèctric	74
4.11.2 Generadors.....	74
4.11.3 Bateries	78
4.12 Transformadors.....	81
4.13 Esquema unifilar.....	83
4.14 Modes d'operació del vaixell	84
4.14.1 Mode dièsel.....	84
4.14.3 Mode dièsel-elèctric amb càrrega.....	85
4.14.4 Mode elèctric	85

4.14.5 Mode connectat	85
Capítol 5. Redimensionament del sistema de combustible	86
5.1 Càlcul del sistema de combustible	87
5.1.1 Resultats	89
5.2 Càlcul del sistema de combustible d'emergència	89
5.2.1 Resultats	89
5.3 Quadre esquemàtic del sistema de combustible	90
Capítol 6. Disposició de la planta propulsiva	91
6.1 Dimensions i pesos de la maquinaria	91
6.1.1 Motor INDAR ACP-500-S/6 de 2500 kW	91
6.1.2 Motor VEM Motors IE2-WE2R 355 L4 NS LL HW de 550 kW	92
6.1.3 Convertidor de freqüència INGEDRIVE LV4F-32-851WA de 2880 kW	93
6.1.4 Convertidor de freqüència INGEDRIVE LV400 de 690 kW	93
6.1.5 Generador Wärtsilä 6L32 de 3340 kW	93
6.1.6 Generador Wärtsilä 9L20 de 1710 kW	94
6.1.7 Generador Wärtsilä 8L20DF de 1230 kW	95
6.1.8 Bateria (cada mòdul ABB CESM de 100 kW)	95
6.1.9 Transformadors ABB	95
6.1.10 Reductora	96
6.2 Dimensions i pesos dels tancs de combustible	96
6.2.1 Tancs magatzem (fuel de 0,991 kg/cm ³)	96
6.2.2 Tancs de sedimentació (fuel de 0,991 kg/cm ³)	96
6.2.3 Tancs de servei diari (fuel de 0,991 kg/cm ³)	96
6.2.4 Tanc d'emergència (dièsel de 0,867 kg/cm ³)	96
6.3 Centres de gravetat del sistema antic	97
6.3.1 Maquinaria antiga	97
6.3.2 Sistema de combustible antic	97
6.4 Procés de disposició	98
6.4.1 Maquinaria nova	100
6.4.2 Sistema de combustible nou	101
Capítol 7: Emissions i cost del sistema propulsiu	103
7.1 Emissions	103
7.1.1 Emissions de l'antiga planta propulsora	104

7.1.2 Emissions de la nova planta propulsora.....	105
7.1.3 Comparació dels consums i les emissions.....	107
7.2 Costos	109
Conclusions	111
Bibliografia	113
Apunts	113
Llibres	113
Webs.....	113
Annexes	116
A.1 Fitxa tècnica Motor 2500 kW	116
A.2 Fitxa tècnica Motor proa.....	117
A.3 Fitxa tècnica Convertidor de freqüència 2880 kW.....	118
A.4 Fitxa tècnica Bateria 100 kW.....	119
A.5 Plànols nous	120
A.6 Plànols antics.....	121

Índex d'il·lustracions

Il·lustració 1: MS Color Hybrid Font: hibridosyelectricos.com	12
Il·lustració 2: MS Roald Amundsen Font: Hurtigruten	13
Il·lustració 3: Esquema del sistema COEOD d'una sola hèlix amb generadors auxiliars Font: Wartsilä	15
Il·lustració 4: Esquema del mode Booster d'un sistema COEOD Font: Ingeteam	15
Il·lustració 5: Esquema del mode Dièsel-Elèctric d'un sistema COEOD Font: Ingeteam	16
Il·lustració 6: Esquema del mode completament elèctric d'un sistema COEOD Font: Ingeteam	16
Il·lustració 7: Esquema del mode trànsit d'un sistema COEOD Font: Ingeteam	17
Il·lustració 8: Esquema del mode paral·lel d'un sistema COEOD Font: Ingeteam	17
Il·lustració 9: Esquema del mode connectat d'un sistema COEOD Font: Ingeteam	18
Il·lustració 10: Esquema del sistema COEOG amb dues hèlix Font: Google Sites	19
Il·lustració 11: Esquema del sistema CODLAG amb dues hèlix Font: Google Sites	20
Il·lustració 12: Esquema del sistema COEOS amb dues hèlix i generadors auxiliars Font: Google Sites	20
Il·lustració 13: Esquema de la combinació de les turbines d'un sistema COGES Font: Google Sites	21
Il·lustració 14: Esquema d'un sistema propulsiu dièsel-elèctric Font: MFAME	22
Il·lustració 15: Model 3D del creuer Font: Documentació del vaixell	27
Il·lustració 16: Star Pride Font: Wikipedia	28
Il·lustració 17: Ruta Barcelona-Roma del Star Pride Font: WindstarCruises	28
Il·lustració 18: Ruta Lisboa-Barcelona del Star Pride Font: WindstarCruises	29
Il·lustració 19: Ruta Roma-Atenes del Star Pride Font: WindstarCruises	29
Il·lustració 20: Le Lyrial Font: VesselFinder	30
Il·lustració 21: Ruta Croàcia-Itàlia del Le Lyrial Font: Cruceros.es	31
Il·lustració 22: Ruta Grècia-Turquia del Le Lyrial Font: Cruceros.es	31
Il·lustració 23: Càlculs per la ventilació de les bateries Font: DNV-GL	50
Il·lustració 24: Càlculs pel volum d'aire lliure en sales de bateries Font: DNV-GL	50
Il·lustració 25: Corba característica del consum de combustible d'un motor dièsel Font: fao.org	55
Il·lustració 26: Esquema d'un sistema propulsiu controlat amb corrent alterna i motors a alta tensió Font: ABB	56
Il·lustració 27: Esquema d'un sistema propulsiu controlat amb corrent alterna a baixa tensió Font: Ingeteam	57
Il·lustració 28: Comparació dels sistemes en corrent alterna i corrent continua Font: ABB	58
Il·lustració 29: Esquema primari unifilar del sistema Font: Propia	59
Il·lustració 30: Motor 2500 kW INDAR	63
Il·lustració 31: Corbes Par-rpm del motor amb reductora i l'hèlix Font: Propia	66
Il·lustració 32: Motor 550 kW VEM Group Font: VEM Group	67
Il·lustració 33: Convertidor de freqüència INGEDRIVE LV4F	68
Il·lustració 34: Recorregut durant l'entrada i sortida del port de Barcelona Font: Propia	73

Il·lustració 35: Generador Wärtsilä Font: Wärtsilä.....	77
Il·lustració 36: Bateria CESM de ABB Font: ABB.....	79
Il·lustració 37: Dibuix del transformador de baix voltatge ABB Font: ABB	82
Il·lustració 38: Esquema del motor INDAR 2500 kW Font: Ingeteam	92
Il·lustració 39: Esquema del motor VEM 550 kW Font: VEM Group.....	92
Il·lustració 40: Esquema del convertidor de freqüència INGEDRIVE de la gama Font: Ingeteam	93
Il·lustració 41: Esquema del generador Wärtsilä 3340 kW Font: Wärtsilä	94
Il·lustració 42: Esquema del generador Wärtsilä 1710 kW Font: Wärtsilä	94
Il·lustració 43: Esquema del generador Wärtsilä 1230 kW Font: Wärtsilä	95
Il·lustració 44: Engranatges dels motors de proa Font: PNGOcean	102

Índex de gràfiques

Gràfica 1: RPM / Velocitat kn	35
Gràfica 2: Par kNm / RPM	36
Gràfica 3: Potència BHP / Velocitat kn.....	37
Gràfica 4: Corba par-velocitat típica d'un motor asíncron de "jaula de ardilla" Font: Universidad Nacional de Perú	64
Gràfica 5: Corba Par-rpm aproximada de cada motor INDAR ACP-500-S/6 Font: Propia.....	65
Gràfica 6: Corba de rendiment d'un generador de 4000 KVA Font: MarelliMotori.....	75
Gràfica 7: Compensació de la demanda energètica per les bateries Font: ABB	80
Gràfica 8: Regulació dels pics de potència per les bateries Font: ABB	80
Gràfica 9: Reducció del THD per les bateries Font: ABB	81

Índex de taules

Taula 1: Resistència a l'avanç per a cada velocitat	33
Taula 2: Resultats de les necessitats propulsives.....	37
Taula 3: Tipus de redundàncies Font: DNV-GL.....	40
Taula 4: Temperatura ambiental Font: DNV-GL.....	45
Taula 5: Temperatura de l'aigua refrigerant Font: DNV-GL	45
Taula 6: Amplades dels passadissos dels quadres de control Font: DNV-GL	49
Taula 7: Espessor de recobriment pels cables Font: DNV-GL	51
Taula 8: Espessor del material conductor per cables de coure Font: DNV-GL.....	51
Taula 9: Espessor del material conductor per cables d'alumini Font: DNV-GL.....	52
Taula 10: Factors de correcció pel cablejat Font: DNV-GL	52
Taula 11: Freqüència i intensitat per a cada velocitat	70
Taula 12: Balanç elèctric.....	74
Taula 13: Balanç elèctric de les màximes potències de cada consumidor.....	82
Taula 14: Maquinaria antiga	97
Taula 15: Sistema de combustible antic.....	97
Taula 16: Maquinaria nova.....	100
Taula 17: Sistema de combustible nou	101
Taula 18: Consum i emissions dels generadors de l'antiga planta propulsora	104
Taula 19: Consum i emissions dels motors de l'antiga planta propulsora.....	104
Taula 20: Consums i coeficients totals de les emissions de l'antiga planta propulsora.....	105
Taula 21: Contingut i consum per hora dels components del VLSFO	106
Taula 22: Consums i coeficients totals de les emissions de la nova planta propulsora	107
Taula 23: Reducció dels consums i les emissions per part de la nova planta propulsora.....	108
Taula 24: Coeficients d'emissions de CO2 de creuers similars segons l'EMSA	108
Taula 25: Cost de la nova maquinaria	110
Taula 26: Cost de la maquinaria antiga	110

Capítol 1. Breu estudi sobre l'ús de la propulsió híbrida en l'entorn naval actual i quins són els sistemes més utilitzats

1.1 Ús de la propulsió híbrida actualment

La propulsió híbrida en l'entorn naval no és un fenomen nou que les companyies navilieres estan adoptant però sí que ho és l'ús de les bateries elèctriques. Des de fa uns quants anys s'utilitzen sistemes híbrids que combinen motors de combustible, turbines de vapor i turbines de gas. Aquests sistemes també s'anomenen híbrids ja que combinen diferents fonts d'energia però no tenen la peculiaritat de reduir les emissions contaminants igual que els sistemes dièsel-elèctrics.

En els últims 4 anys moltes empreses navilieres estan apostant per la propulsió elèctrica o dièsel-elèctrica per tal d'eliminar o reduir les emissions dels combustibles. Actualment la propulsió únicament elèctrica s'està implementant en vaixells que realitzen rutes curtes com ferris, embarcacions d'esbarjo i embarcacions de port ja que resulta molt complicat dissenyar sistemes amb bateries capaços d'alimentar grans vaixells durant grans períodes de temps.

És per això que la propulsió híbrida està sent la solució que moltes companyies navilieres que operen creuers i ferris amb grans distàncies estan adoptant. Són sistemes que consisteixen en la combinació de bateries i generadors dièsel que subministren electricitat als motors elèctrics i a la resta dels sistemes del vaixell.

Aquests sistemes suposen una reducció molt significativa de les emissions dels combustibles i augmenten l'eficiència a l'hora de la utilització de generadors dièsel.

Cal destacar que, des de fa uns quants anys, dins del sector militar com és el cas dels submarins, utilitzen sistemes dièsel-elèctrics per tal de navegar submergits utilitzant bateries i navegar semisubmergits utilitzant el dièsel. En aquest cas s'utilitza perquè això suposa una reducció molt significativa del soroll ja que, les bateries, no produeixen contaminació acústica com és el cas dels motors de combustible.

1.1.1 MS Color Hybrid

A l'Agost del 2019 va entrar en servei el vaixell híbrid dièsel-elèctric més gran del món operat per la companyia Color Line. El MS Color Hybrid és un ferri dissenyat per operar entre Sandefjord, Noruega i Strömstad, Suècia i transportar 2000 persones i 500 vehicles.

Amb una eslora de 160 metres està equipat amb 50 bateries del Tesla Model S que li proporcionen una capacitat de 5 MWh per navegar durant 60 minuts a 12 nusos i es carreguen mitjançant la connexió a port o els generadors dièsel instal·lats a bord.

Aquest tipus de sistema propulsiu suposa una disminució molt significativa de les emissions del combustible ja que, durant gran part del trajecte, és capaç de navegar sense l'ús del fuel oil. A més, suposa més eficiència en quan s'utilitzen els generadors dièsel ja que les bateries ajuden a compensar les pujades i baixades de consum.



Il·lustració 1: MS Color Hybrid Font: hibridosyelectricos.com

1.1.2 MS Roald Amundsen

El MS Roald Amundsen és un creuer d'expedició híbrid de la companyia Hurtigruten que, igual que el Color Line, utilitza un sistema propulsiu dièsel-elèctric amb bateries que li permet navegar sense consumir combustible durant 30 minuts i reduint les emissions un 20% durant la navegació normal.

Des del Juliol del 2019 va entrar en servei per realitzar rutes en llocs no gaire freqüents pels vaixells de la mateixa mida com la travessia del pas del Nord-Oest dins del cercle polar Àrtic. Amb una eslora de 140 metres i una amplada de 24 metres té una capacitat per 600 passatgers on estaran habitabilitats dins d'unes instal·lacions de luxe.

Durant el 2020 es posarà en servei un altre creuer de luxe molt semblant al MS Roald Amundsen de la mateixa companyia, el Fridtjot Nansen, també híbrid i amb característiques propulsives molt semblants.



Il·lustració 2: MS Roald Amundsen Font: Hurtigruten

1.2 Sistemes híbrids de propulsió elèctrica

Actualment existeixen moltes combinacions de propulsió híbrida, també coneguda com a propulsió mixta, les quals estan normalment dissenyades per utilitzar energia elèctrica a baixes velocitats i energia procedent de combustibles fòssils a més altes velocitats. Les combinacions més conegudes normalment estan unides mecànicament mitjançant embragatges que permeten combinar les diferents màquines propulsives depenent del mode d'operació que es desitja obtenir.

Recentment s'estan obtenint diferents propulsions híbrides que no estan unides mecànicament mitjançant embragatges, sinó, elèctricament. Això significa que tota l'energia és produïda a través de màquines que utilitzen combustibles fòssils, com són els generadors dièsel, i que conseqüentment l'emmagatzemen en bateries perquè sigui utilitzada pels motors elèctrics en qualsevol mode d'operació i la resta de consumidors de a bord.

En aquest estudi previ al disseny propulsiu, es donarà principal importància als dos sistemes híbrids que combinen dièsel i electricitat. També es descriuran, més breument, altres sistemes híbrids.

A continuació es descriurà la propulsió híbrida elèctrica més utilitzada (COEOD) juntament amb altres alternatives que també utilitzen motors elèctrics juntament amb màquines consumidores de combustibles fòssils (COEOG, CODLAG, COEOS, COGES).

Finalment es descriurà la propulsió híbrida més moderna constituïda per motors dièsel i màquines elèctriques que no consta d'unions mecàniques entre aquests.

1.2.1 Sistema COEOD

El sistema COEOD (COMbined Electric Or Diesel) és un sistema híbrid unit mecànicament per embragatges que combina el motor o motors dièsel amb una màquina o màquines elèctriques síncrones que poden actuar tant com a alternador o com a motor.

Es basa principalment en l'ús de motors dièsel per a velocitats superiors (entre 10 i 25 nusos), que a la vegada que propulsen les hèlix (de pas controlable preferiblement) generen electricitat mitjançant els motors síncrons utilitzats com a alternadors. Aquests són coneguts, també, com a “Shaft Generators”, que per a baixes velocitats (menys de 10 nusos), s'utilitzen com a motors elèctrics per propulsar l'embarcació mentre els motors dièsel romanen desembragats i apagats. En quant s'utilitzen els motors elèctrics per a la propulsió de l'embarcació, és necessari l'ús de convertidors de freqüència que permeten controlar les revolucions d'aquests i en conseqüència les de les hèlix que, es poden mantenir a pas fixa i, així, augmentar el rendiment.

A més a més, gràcies al convertidor de freqüència mencionat anteriorment que sempre està instal·lat al centre del sistema, tant el motor dièsel com la màquina síncrona, poden operar en diferents velocitats ja que, aquest, sempre manté el voltatge i la freqüència de l'electricitat als valors fixats per al seu consum i emmagatzematge.

Tot i que normalment, el motor dièsel, sempre opera amb les mateixes revolucions, que són les del punt específic de consum mínim i, per això, les pales de les hèlix es dissenyen de pas variable per aquest tipus de sistemes propulsius.

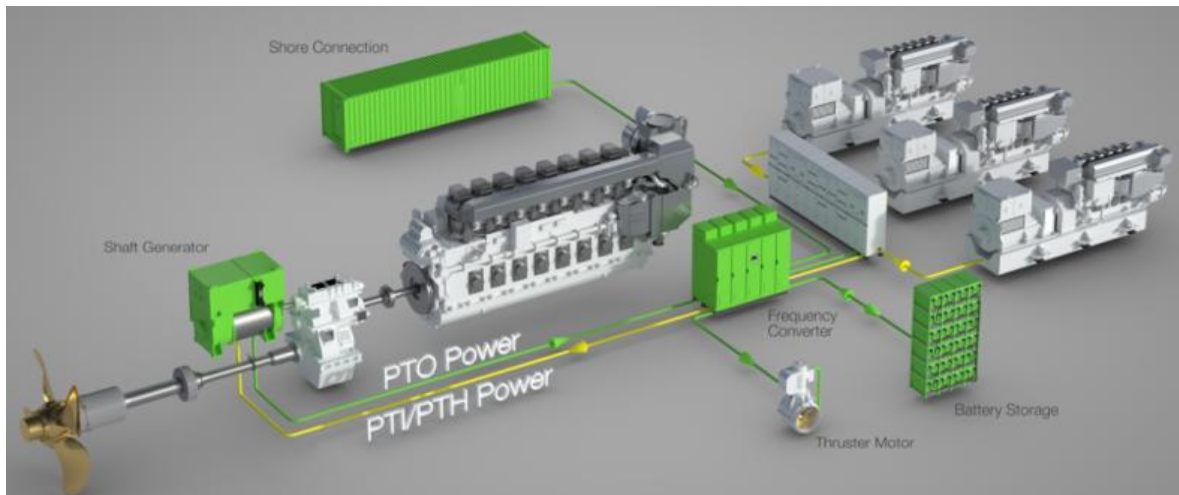
El “Shaft Generator” que tant pot actuar com a alternador o com a motor, sempre que la demanda propulsiva és menor que la subministrada pel motor dièsel, genera electricitat per ser consumida i, sobretot, emmagatzemada a les bateries. D'aquesta manera, sempre s'intenta tenir suficient electricitat emmagatzemada a les bateries per quan s'utilitza el “Shaft Generator” com a motor elèctric.

Per cada eix d'hèlix es pot disposar d'un “Shaft Generator” que actuarà com a alternador o com a motor elèctric depenent del mode d'operació en que estigui l'embarcació. Aquestes màquines síncrones també s'utilitzen com a motor a l'hora d'accelerar i desaccelerar per aportar potència i reduir el consum del motor dièsel.

Per tal de fer possible aquest sistema de propulsió, s'utilitzen reductores que permeten embragar i desembragar qualsevol de les màquines propulsives o, també, només l'hèlix si el que es pretén és generar electricitat únicament sense produir moviment.

Aquest fet es pot produir en condicions de carga i descarrega a port on s'utilitzen sistemes que requereixen elevada potència que no pot ser subministrada per segons quins molls i les bateries no disposen de suficient càrrega. També és possible l'ús de generadors auxiliars per quan es produeix aquest fet o per quan la demanda energètica de la resta de sistemes i serveis del vaixell és massa elevada per ser únicament coberta pels “Shaft Generators”.

La següent il·lustració mostra l'esquema d'un sistema COEOD amb una sola hèlix propulsiva i amb generadors auxiliars. Es pot observar que el motor dièsel, el “Shaft Generator” i l'eix de l'hèlix estan units mecànicament mitjançant una reductora amb embragatges.

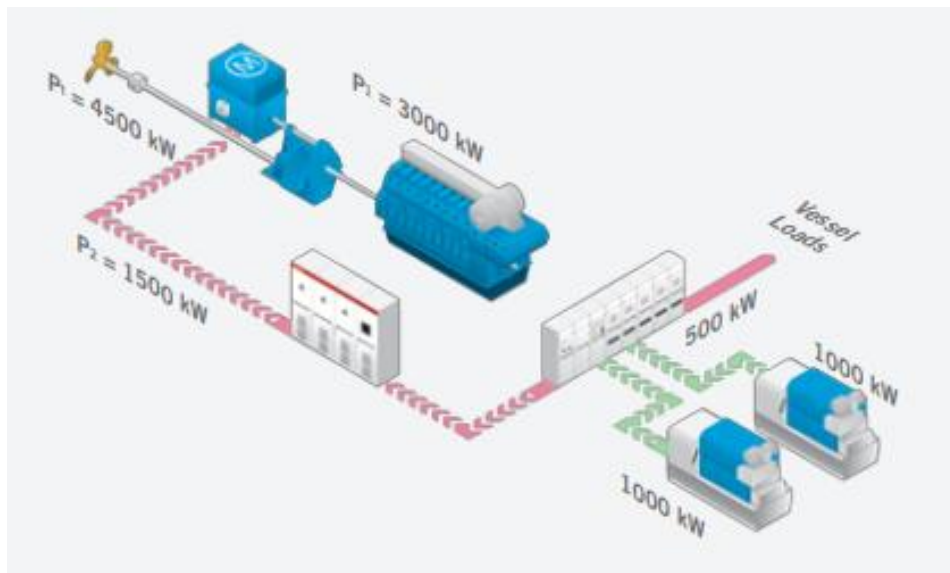


Il·lustració 3: Esquema del sistema COEOD d'una sola hèlix amb generadors auxiliars Font: Wärtsilä

Existeixen 6 modes diferents d'operació per al sistema COEOD per tal de consumir el mínim possible en tots els casos de navegació en que es pot trobar el vaixell. Són els següents:

Mode Booster

Quan el vaixell requereix una velocitat que sobrepassa el punt específic de consum mínim i necessita l'aportació de potència per part del "Shaft Generator". La potència subministrada a les hèlix és la suma de la potència subministrada pel motor dièsel i els generadors a través del motor elèctric. S'utilitza amb un efecte similar al de posar en servei un cilindre addicional al propi motor dièsel.

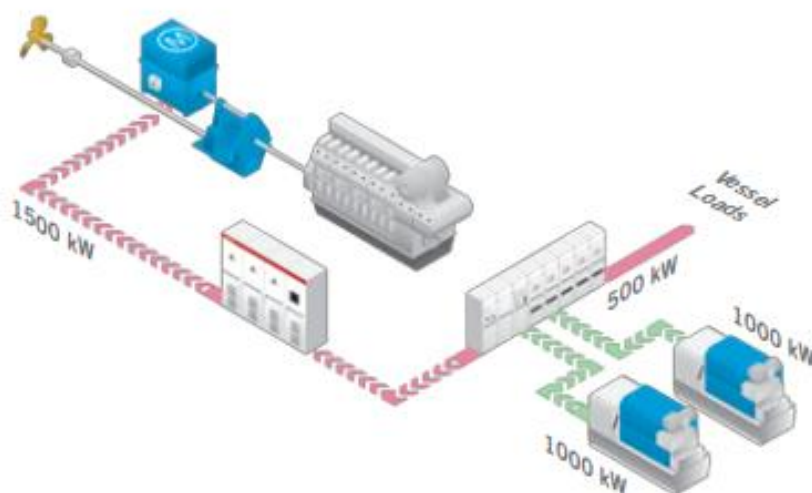


Il·lustració 4: Esquema del mode Booster d'un sistema COEOD Font: Ingeteam

Aquest mode funciona igual que el sistema DEBD (Diesel Electric Booster Drive) dissenyat al 1997 amb la necessitat de subministrar potències propulsores superiors a 65 MW que resultaven impossibles de ser generades per motors dièsel ja que no existien tal tipus de màquines i es desconeixien els resultats que suposaria la seva creació.

Mode Dièsel-Elèctric

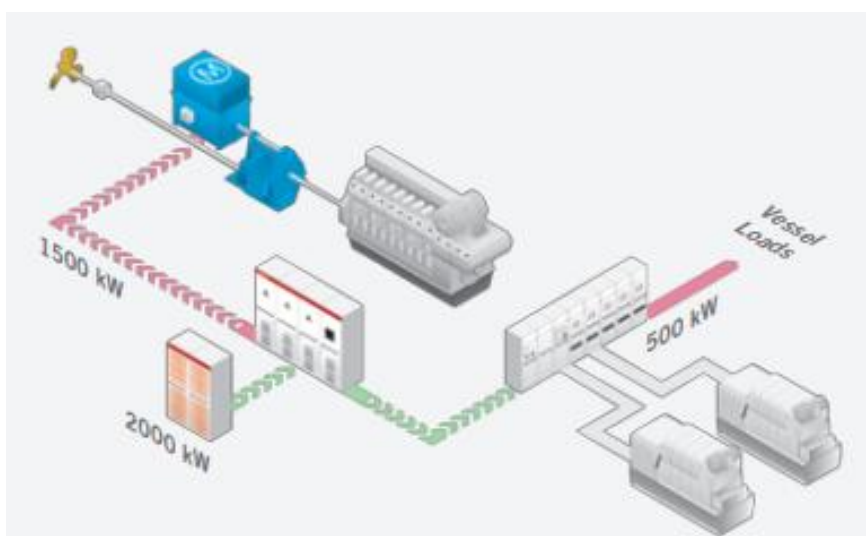
Quan a baixes velocitats no es necessita la potència propulsora del motor dièsel per propulsar l'embarcació i alimentar la resta de sistemes del vaixell i s'utilitzen els generadors auxiliars per alimentar el "Shaft Generator" i els diferents consumidors. També es fa servir en cas de fallada del motor principal.



Il·lustració 5: Esquema del mode Dièsel-Elèctric d'un sistema COEOD Font: Ingeteam

Mode Completament elèctric

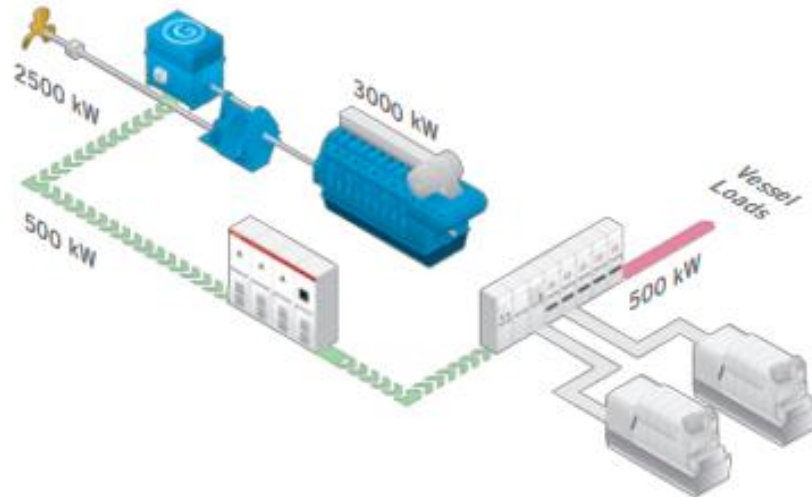
Aquest mode s'utilitza per a baixes velocitats i per quan no es vol emetre gasos contaminants ni fer soroll. Consisteix en apagar tots els motors dièsel i en utilitzar l'energia emmagatzemada en les bateries per alimentar el "Shaft Generator" i la resta de consumidors del vaixell.



Il·lustració 6: Esquema del mode completament elèctric d'un sistema COEOD Font: Ingeteam

Mode Trànsit

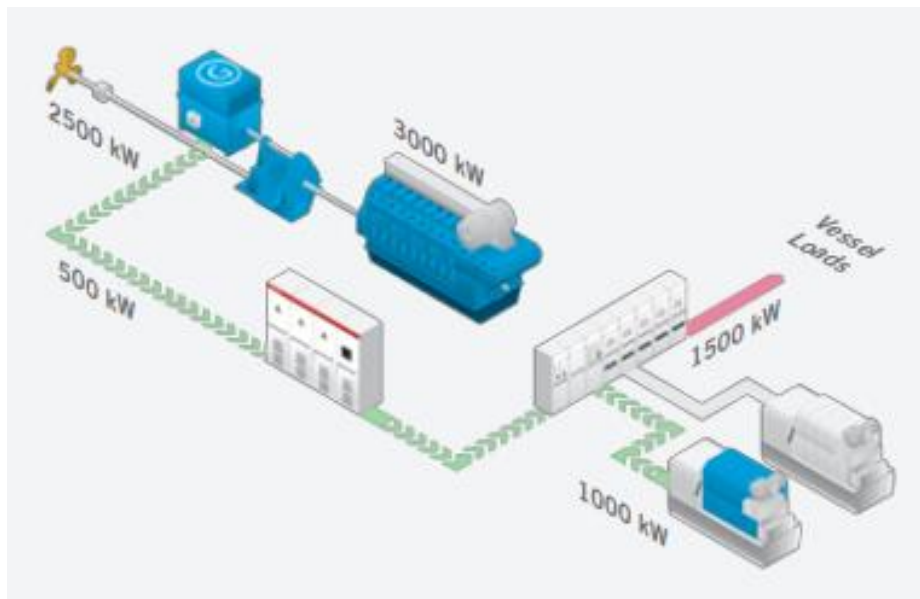
Aquest és el mode més utilitzat durant la navegació a alta mar ja que és el més eficient per a altes velocitats. Simplement s'utilitza el motor dièsel per a la propulsió i la generació d'electricitat a través del "Shaft Generator" per a la resta de consumidors del vaixell. Els generadors romanen apagats.



Il·lustració 7: Esquema del mode trànsit d'un sistema COEOD Font: Ingeteam

Mode Paral·lel

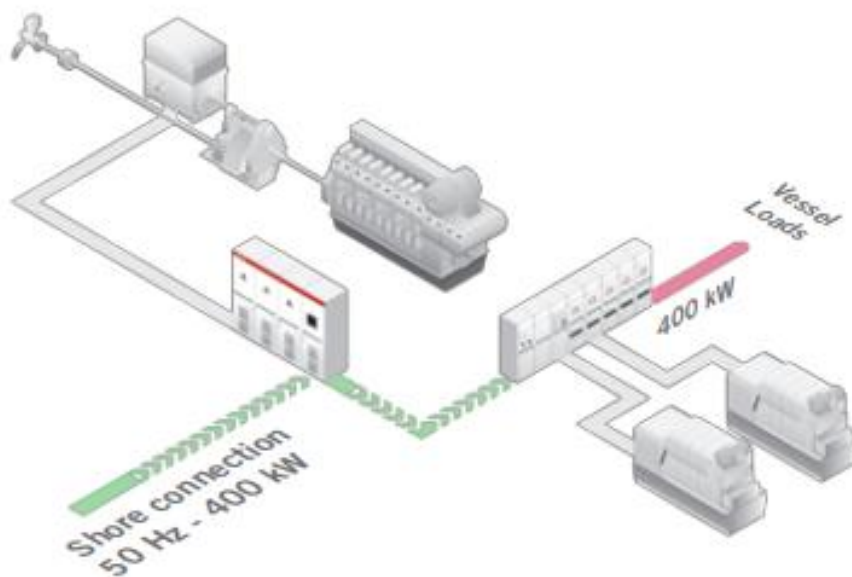
Quan la demanda energètica de la resta de sistemes i consumidors del vaixell que necessiten electricitat supera la generada pel "Shaft Generator" és necessari l'ús d'algun dels generadors per tal de complementar-la.



Il·lustració 8: Esquema del mode paral·lel d'un sistema COEOD Font: Ingeteam

Mode Connectat

Aquest és el mode utilitzat quan el vaixell està atracat i la demanda energètica de a bord pot ser coberta per la connexió a port. També s'intenta que durant l'estància es carreguin les bateries el màxim possible per a la reducció del combustible en situacions posteriors.



Il·lustració 9: Esquema del mode connectat d'un sistema COEOD Font: Ingeteam

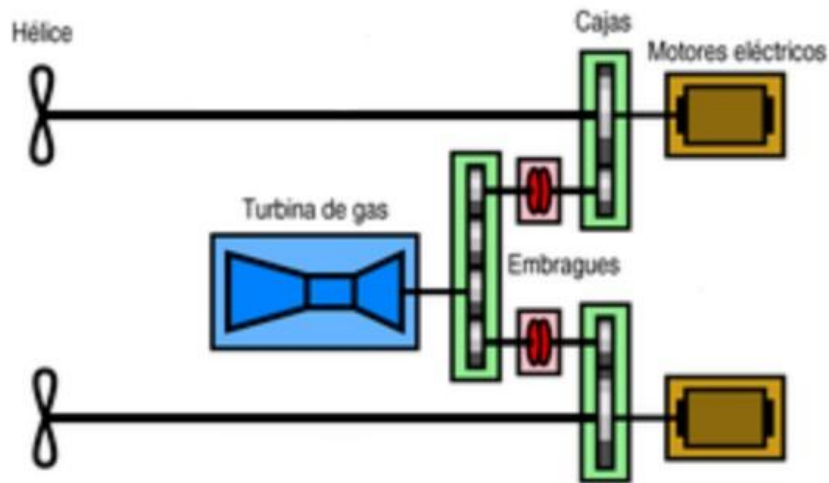
1.2.2 Sistema COEOG

El sistema COEOG (COMbined Electric Or Gas) és un sistema híbrid unit mecànicament per embragatges que combina la turbina de gas amb la màquina o màquines elèctriques que poden actuar tant com a motors o com a alternadors.

El sistema funciona igual que el COEOD de tal manera que per a altes velocitats (entre 10 i 25 nusos), la turbina de gas, es manté embragada al sistema i proporciona la propulsió a l'embarcació mentre que, els "Shaft Generators" actuen com a alternadors per generar electricitat i emmagatzemar-la a les bateries. En quant el vaixell està en un mode d'operació per a baixes velocitats (menys de 10 nusos) es desembraga la turbina i s'utilitzen els motors elèctrics alimentats per les bateries.

És un sistema similar al COEOD amb la diferència de que en comptes d'utilitzar motors dièsel s'utilitzen turbines de gas. La resta de funcions són les mateixes que el sistema mencionat anteriorment.

La següent il·lustració mostra l'esquema d'un sistema COEOG amb dues hèlix propulsives.



Il·lustració 10: Esquema del sistema COEOG amb dues hèlix Font: Google Sites

1.2.3 Sistema CODLAG

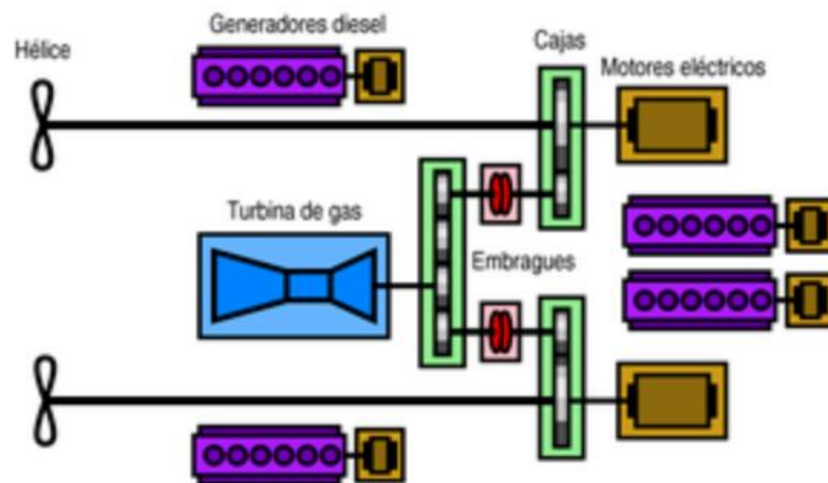
El sistema CODLAG (COmbined Diesel-eLectric and Gas) és un sistema híbrid unit mecànicament per embragatges que combina la turbina de gas amb la màquina o màquines elèctriques que poden actuar tant com a motors com a alternadors. També disposa de generadors dièsel que estan connectats al sistema elèctricament i que generen electricitat per a la càrrega de bateries.

Al igual que els sistemes anteriors, per a grans velocitats (entre 10 i 25 nusos) s'utilitza la turbina embragada amb les hèlix i per baixes velocitats (menys de 10 nusos) es desembraga per utilitzar únicament els motors elèctrics "Shaft Generators".

A més a més, es disposa de generadors dièsel que es poden utilitzar en qualsevol moment depenent de l'estat de càrrega de les bateries i de la demanda energètica dels altres sistemes i serveis del vaixell.

Es podria dir que, el sistema CODLAG, és una millora del sistema COEOG ja que disposa de generadors d'electricitat per ampliar la càrrega de les bateries i augmentar el rendiment en quant només es vol utilitzar electricitat.

La següent il·lustració mostra l'esquema d'un sistema CODLAG amb dues hèlix propulsives.



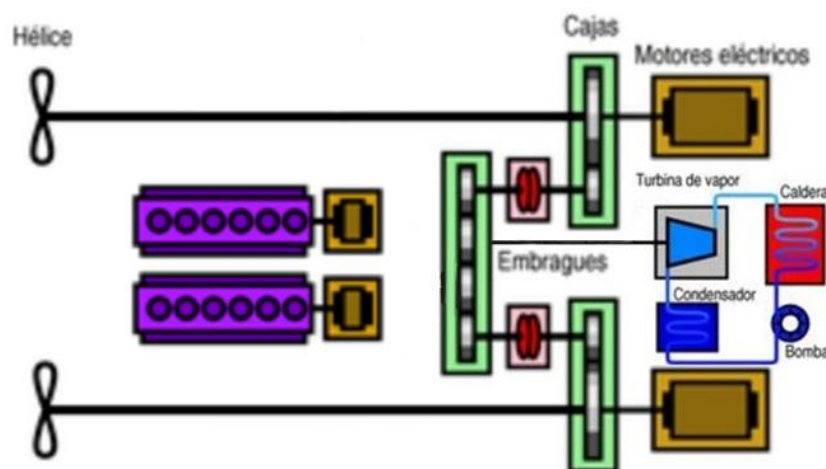
Il·lustració 11: Esquema del sistema CODLAG amb dues hèlix Font: Google Sites

1.2.4 Sistema COEOS

El sistema COEOS (COMbined Electric Or Steam) és un sistema híbrid unit mecànicament per embragatges que combina la turbina de vapor amb la màquina o màquines elèctriques que poden actuar tant com a motors com a alternadors.

El funcionament és el mateix que el sistema COEOG amb la diferència de que la turbina és de vapor en comptes de gas. També pot incloure generadors auxiliars per tal de complementar la demanda energètica del vaixell.

La següent il·lustració mostra l'esquema d'un sistema COEOS amb dues hèlix propulsives. La turbina de vapor genera el moviment necessari per la propulsió de les hèlix i la generació d'electricitat a través dels alternadors.



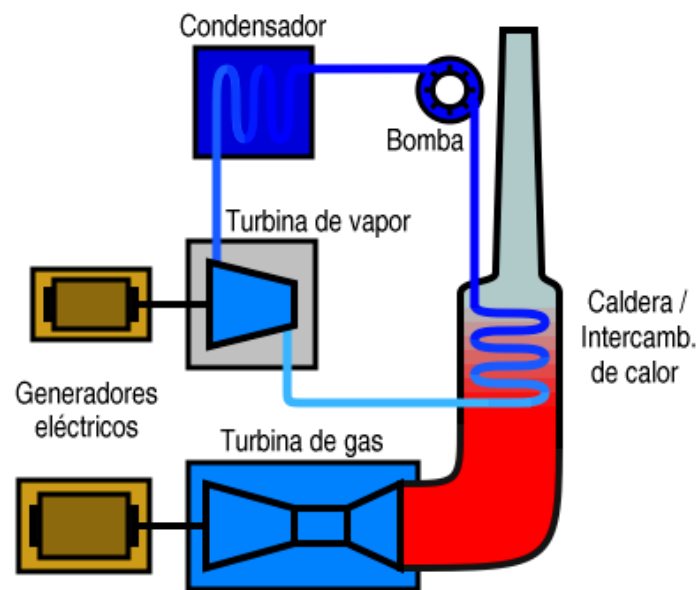
Il·lustració 12: Esquema del sistema COEOS amb dues hèlix i generadors auxiliars Font: Google Sites

1.2.5 Sistema COGES

El sistema COEGS (Combined Electric Gas Steam) és un sistema híbrid que combina la turbina de vapor i la turbina de gas amb màquines elèctriques. Aquest sistema no està del tot unit mecànicament ja que per una banda hi ha la part generadora d'energia elèctrica que consta de les turbines i els alternadors i, per l'altre, els motors elèctrics que mouen els eixos de les hèlix.

Aquesta combinació de turbines s'ha dissenyat per tal d'aprofitar els gasos calents d'escapament de la turbina de gas per escalfar l'aigua en la fase de la caldera per la turbina de vapor. Això proporciona més energia per volum de càmera de màquines que qualsevol altre sistema COEOD (dièsel-elèctric embragat) tot i que, cal destacar, que pot arribar a consumir un 40% més de massa de combustible fòssil.

És un sistema que depèn de la instal·lació de bateries per poder determinar els modes operatius en els que actuen simplement els motors elèctrics sense consumir combustibles fòssils ja que, les turbines, s'intenten mantenir en funcionament per l'inconvenient que suposa la fase d'arrencada. Durant aquesta fase, la caldera està freda i es necessita generar gran quantitat de calor que provoca elevades tensions tèrmiques en les canonades del sistema.

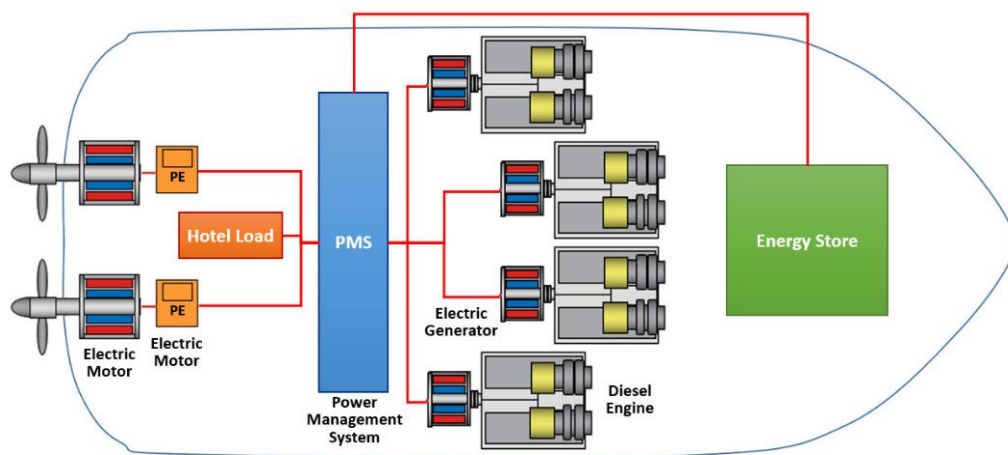


Il·lustració 13: Esquema de la combinació de les turbines d'un sistema COGES Font: Google Sites

1.2.6 Sistema Dièsel-Elèctric

Recentment s'estan dissenyant sistemes propulsius híbrids entre motors dièsel i màquines elèctriques que no estan units mecànicament per embragatges, sinó, elèctricament mitjançant components elèctrics.

Es basa, principalment, en l'ús de generadors dièsel de diferents potències que, segons la demanda propulsiva i energètica per part dels motors elèctrics i la resta de sistemes i consumidors de a bord, generen suficient electricitat per propulsar i subministrar l'embarcació. Aquests tipus de sistemes poden estar dotats de bateries i/o cel·les de combustible per emmagatzemar energia elèctrica i poder navegar sense consumir dièsel segons quins modes de navegació.



Il·lustració 14: Esquema d'un sistema propulsiu dièsel-elèctric Font: MFAME

Els sistema es compon principalment pels següents components:

Generadors dièsel

Són els encarregats de generar energia elèctrica a través d'un combustible fòssil com és el dièsel o el fuel oil. Estan compostos per un motor que genera moviment rotatori i un alternador acoblat que transforma aquest moviment en energia elèctrica. Normalment tenen, de mitjana, un rendiment del 97% ja que sempre treballen amb les mateixes rpm en el punt d'eficiència màxima subministrant una quantitat fixa d'energia.

Cada tipus de sistema propulsiu, com els mencionats anteriorment, estan dotats per un nombre diferent de generadors amb diferents potències segons les necessitats energètiques. En aquest cas en concret, els generadors dièsel són l'únic element de generació d'electricitat per a tots els sistemes del vaixell. És per això que, a més, han d'estar equipats amb generadors d'emergència que permetin la tornada segura a port de l'embarcació.

Quadre principal de distribució

En qualsevol dels sistemes mencionats anteriorment és necessari l'ús d'un quadre principal de distribució de l'electricitat procedent de la planta propulsiva cap als diferents consumidors. Però, en aquest sistema en concret, l'ús d'aquest component és primordial per la unió de tots els elements ja que és el centre del sistema.

És el component encarregat de distribuir l'energia elèctrica procedent dels generadors cap als diferents consumidors, motors propulsors i bateries, depenent de la demanda en cada mode d'operació en el que es troba el vaixell. Incorpora tots els elements necessaris per la correcta sincronització i repartició de càrrega mesurant, regulant i controlant, en tot moment, tota l'electricitat generada. La correcta automatització de tots aquests elements és essencial per tal d'aconseguir la màxima eficiència de la planta propulsora. També consta de tots els elements necessaris per la correcta protecció i aïllament per tal de complir amb les normes de seguretat establertes i poder desconnectar, automàticament i manualment, qualsevol component. Els quadres principals de distribució tenen una mitjana del 0,2% de pèrdues per calor que, a efectes pràctics, és irrellevant.

Annexat al quadre principal de distribució, ha d'estar situat el quadre de distribució d'emergència que en cas de fallada, permeti la utilització dels generadors d'emergència.

Convertidors AC-DC / DC-AC

Els convertidors AC-DC són els components encarregats de convertir el corrent altern procedent dels generadors dièsel a corrent continu cap a la xarxa elèctrica on es troba el quadre principal de distribució. Els convertidors DC-AC, en canvi, són els encarregats de tornar a convertir el corrent continu en corrent altern perquè els motors elèctrics que, en la majoria de casos, funcionen amb AC, puguin ser alimentats correctament.

Aquests convertidors no són necessaris per a tots els sistemes propulsius híbrids però, si essencials en el cas de que s'utilitzin bateries en el sistema ja que, aquestes, necessiten ser carregades i descarregades en una xarxa de corrent continua.

Transformadors

Per tal de poder subministrar el voltatge adequat a tots els consumidors del vaixell, és essencial transformar el voltatge de la planta elèctrica reduint-lo a un valor de 230V, normalment. També s'utilitzen per transformar el voltatge de la planta cap a qualsevol motor elèctric que utilitza diferents valors de corrent. Les pèrdues per calor d'aquests components oscil·len, normalment, el 1%.

Convertidors de freqüència

Les freqüències habituals en les plantes elèctriques dels vaixells són, normalment, 60Hz en el continent americà i 50Hz en el continent europeu.

És per això que, per regular la velocitat dels motors elèctrics, és essencial l'ús dels convertidors de freqüència que permeten regular les revolucions sense perdre rendiment i, en conseqüència, poder optar per hèlixs de pas fixa. Tenen una mitjana del 1,5% de pèrdues per calor.

Motors elèctrics

Són els components encarregats de la propulsió total del vaixell gràcies a la transformació de l'energia elèctrica, subministrada per part del sistema, en energia mecànica de rotació. Aquesta transformació es du a terme gràcies a la generació de camps magnètics entre el rotor (part interna que rota) i el estator (part externa fixa).

Normalment, per a grans demandes de potència com són les dels vaixells, s'utilitzen motors de corrent altern (AC) trifàsics com són els anomenats Síncrons i Asíncrons.

Els motors Asíncrons trifàsics estan compostos per un rotor que pot ser de tipus bobinat o de "jaula de ardilla" i per un estator que conté les bobines inductores trifàsiques desfasades 120° entre si. En quant es fa passar el corrent altern per les bonies de l'estator es genera el camp magnètic encarregat d'induir tensió al rotor i generar-li el moviment rotatori. En aquest tipus de motor en particular, existeix una diferència de velocitat entre el rotor i el camp magnètic generat, anomenat lliscament. Això provoca que el rendiment d'aquest tipus de motor sigui lleugerament inferior al dels motors síncrons. Normalment tenen una mitjana de rendiment del 96%.

Els motors Síncrons trifàsics també estan compostos per un rotor i un estator en els quals se'ls hi subministra corrent continu (DC) i corrent altern (AC) respectivament perquè es produeixi el camp magnètic i, així, el moviment mecànic rotatori. El propi motor consta d'un petit generador de corrent continu pel rotor, per tant, segueix sent alimentat únicament per corrent altern igual que els motors asíncrons. En aquest tipus de motors, les velocitats de rotació del camp magnètic de l'estator i el rotor estan sincronitzades i gràcies a això el rendiment es lleugerament més alt que els motors asíncrons amb una mitjana de 97%.

Els motors elèctrics, a diferència dels motors dièsel, tenen un rendiment molt elevat, el que significa una reducció important de pèrdues d'energia. També cal destacar que, gràcies als convertidors de freqüència anomenats anteriorment, és fàcil variar les velocitats de gir dels motors, cosa que significa que no són necessàries les hèlix de pas variable que suposen una reducció del rendiment total del sistema.

Cal destacar que els motors elèctrics tenen capacitat de sobrecarregar-se durant un cert període de temps per oferir més potència que la nominal, fet que suposa que en casos de mala mar on es necessita més energia, sigui possible un subministrament superior. També cal dir que són màquines que s'autorregulen la intensitat que necessiten en funció del par que han de generar depenent de la resistència i això suposa que no es perd energia elèctrica en quant les demandes canvien bruscament.

Bateries

Són els elements del sistema encarregats d'emmagatzemar l'energia elèctrica i utilitzar-la quan sigui convenient sense necessitat d'utilitzar combustibles fòssils. S'utilitzen en sistemes híbrids per tal de navegar sense consumir combustible segons quins règims de navegació i controlar els pics i les baixades de potència demandades pel sistema elèctric millorant l'eficiència dels generadors. La utilització de bateries suposa un increment considerable de l'eficiència energètica però són elements cars i pesats que necessiten estar en llocs adequats amb temperatures d'entre 16 i 28 °C.

Recentment les més utilitzades són les de ió de liti ja que suposen certes avantatges i millores respecte d'altres tipus. Les avantatges són les següents:

- Acumulen més càrrega per unitat de pes i volum la qual cosa disminueix el pes del conjunt.
- Gran velocitat de càrrega i descàrrega la qual cosa augmenta la potència que poden subministrar.
- Tenen molt poc efecte memòria, cosa que significa que la capacitat no es redueix en càrregues incomplertes.
- Les descàrregues són lineals des de que la bateria es troba completament carregada fins a la total descàrrega.
- Tenen molt baixa taxa d'autodescàrrega.

També suposen inconvenients com:

- Tenen una duració limitada pel número de cicles de càrrega i descàrrega.
- Són més costoses.
- Poden sobrecaletar-se amb facilitat.
- Tenen menys rendiment en temperatures molt baixes.

Capítol 2. Estudi previ de les rutes de navegació i les necessitats propulsives

2.1 Característiques del creuer projecte

El vaixell en el qual es dissenyarà la planta propulsiva es tracte d'un petit creuer de luxe per a 250 passatgers i 125 tripulants sense restriccions de rutes de navegació i amb una autonomia de 4000 milles. El creuer, dissenyat pels estudiants de la UPM de Madrid Jorge Vicario i Juan Urrutia al 2003, té una filosofia de vaixell de gran luxe, cosa que significa que els consums són elevats i l'eficiència no és el seu objectiu. És un creuer que està per sota de la mitja en quant a nombre de passatgers i per sobre d'aquesta en quant a espai per passatger.

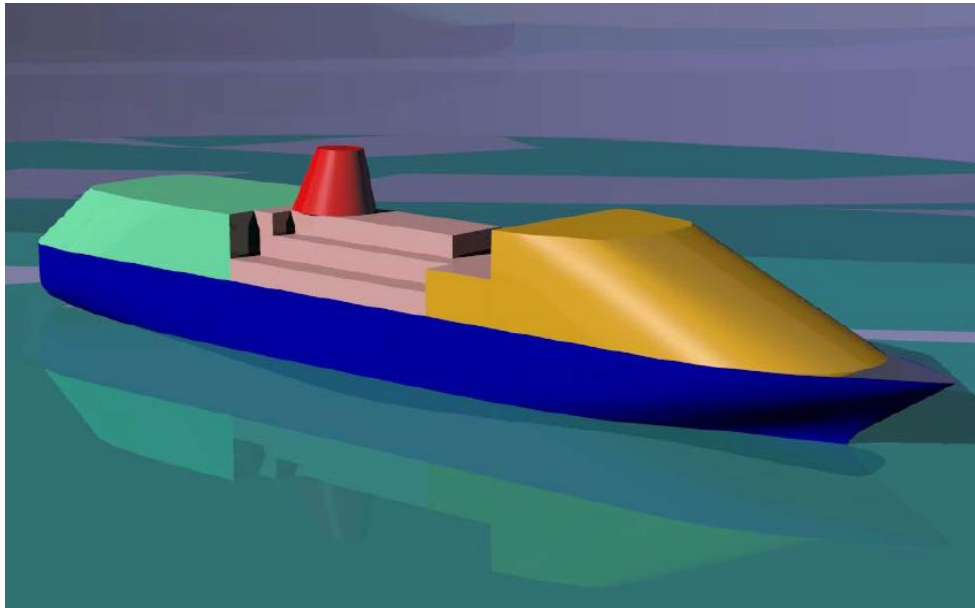
Les característiques principals són:

- Eslora màxima: 139 m
- Eslora de flotació: 123,2 m
- Eslora entre perpendiculars: 116,5 m
- Mànega: 22,35 m
- Calat: 5,4 m
- Volum de obra viva: 8405,27 m³
- Desplaçament: 8615 t
- Coeficient de bloc: 0,569
- Coeficient de quaderna mestra: 0,98
- Coeficient prismàtic: 0,58
- Coeficient de flotació: 0,826
- Posició longitudinal del centre de carena: -2,296 %Lpp
- Àrea transversal del bulb: 7,719 m²
- Àrea transversal del mirall de popa: 0 m²
- Superfície mullada: 3047 m²
- Rugositat del buc: 150 µm

Disposa de 4 motors de popa repartits per a 2 propulsors i 2 hèlix de proa. Els motors consten de 2380 kW de potència cadascun destinats al servei del 81% de la seva capacitat amb un consum de 200 g/kWh de fuel oil amb densitat de 942 kg/m³.

També disposa de 5 generadors auxiliars amb una potència total de 9735 kW i amb el mateix consum de fuel oil que els motors principals. Estan pensats per utilitzar-ne 4 en condicions normals i un d'emergència.

Durant el treball s'aniran mostrant altres característiques importants per dur a terme càlculs sobre el disseny del sistema propulsiu.



Il·lustració 15: Model 3D del creuer Font: Documentació del vaixell

Annexats al document (A.6) es troben els plànols del perfil i de les cobertes 1 i 2 que s'utilitzaran pel disseny de la nova planta propulsora.

2.2 Creuers de luxe semblants i rutes més comuns pel mar mediterrani

En aquest apartat es farà un breu estudi sobre les rutes més comuns pel mar Mediterrani dels creuers de luxe amb característiques semblants. S'estudiaran les distàncies dels trajectes que fan el Star Pride i el Le Lyrial ja que són dos creuers de luxe amb característiques semblants i que estan destinats al mateix objectiu de navegació.

2.2.1 Star Pride

El Star Pride és un creuer de luxe de la companyia Seabourn Cruise Line que actualment està operat per l'empresa Windstar Cruises i realitza rutes pel Mar Mediterrani. També està el Star Legend que és molt similar en quant a característiques i rutes. Les principals característiques del Star Pride són:

- Eslora: 133,4m
- Mànega: 20,5m
- Calat: 5,42m
- Capacitat: 208 passatgers i 164 tripulants
- Propulsió: Potència instal·lada de 7280 kW repartida en 2 propulsors amb una velocitat màxima de 19 kn i velocitat de servei de 16 kn



Il·lustració 16: Star Pride Font: Wikipedia

Rutes

Ruta Barcelona-Roma



Il·lustració 17: Ruta Barcelona-Roma del Star Pride Font: WindstarCruises

- Ruta més curta: Cannes-Monaco / 27 milles nàutiques
- Ruta més llarga: Palamós-Sanary sur Mer / 136 milles nàutiques
- Estància mitja a port: Entre 10 i 12 hores
- Distància total: 580 milles nàutiques

Ruta Lisboa-Barcelona



Il·lustració 18: Ruta Lisboa-Barcelona del Star Pride Font: WindstarCruises

- Ruta més curta: Cadis-Tànger / 74 milles nàutiques
- Ruta més llarga: Almeria-Palma / 344 milles nàutiques
- Estància mitja a port: Entre 9 i 13 hores
- Distància total: 990 milles nàutiques

Ruta Roma-Atenes



Il·lustració 19: Ruta Roma-Atenes del Star Pride Font: WindstarCruises

- Ruta més curta: Milos-Santorini / 57 milles nàutiques
- Ruta més llarga: Valleta-Fiskardo / 326 milles nàutiques
- Estància mitja a port: Entre 8 i 13 hores
- Distància total: 1500 milles nàutiques

Mitjanes totals:

- Rutes curtes d'entre 27 i 74 milles nàutiques
- Rutes llargues d'entre 136 i 344 milles nàutiques
- Estàncies a port d'entre 8 i 13 hores
- Distàncies totals d'unes d'entre 580 i 1500 milles nàutiques

2.2.2 Le Lyrial

El Le Lyrial és un creuer de luxe de la companyia Ponant que realitza rutes pel Mar Mediterrani. També està el Le Bougainville que és molt similar en quant a característiques i rutes i pertany a la mateixa companyia. Les principals característiques del Le Lyrial són:

- Eslora: 148m
- Mànega: 18m
- Calat: 4,8m
- Capacitat: 264 passatgers i 139 tripulants
- Propulsió: Potència repartida en 2 propulsors amb una velocitat servei de 16 kn



Il·lustració 20: Le Lyrial Font: VesselFinder

Rutes

Ruta Croàcia-Itàlia:



Il·lustració 21: Ruta Croàcia-Itàlia del Le Lyrial Font: Cruceros.es

- Ruta més curta: Korčula-Split / 63 milles nàutiques
- Ruta més llarga: Venècia-Hvar / 225 milles nàutiques
- Estància mitja a port: Entre 12 i 16 hores
- Distància total: 600 milles nàutiques

Ruta Grècia-Turquia



Il·lustració 22: Ruta Grècia-Turquia del Le Lyrial Font: Cruceros.es

- Ruta més curta: Mykonos-Paros / 26 milles nàutiques
- Ruta més llarga: Istanbul-Limnos / 215 milles nàutiques
- Estància mitja a port: Entre 11 i 17 hores
- Distància total: 700 milles nàutiques

Mitjanes totals:

- Rutes curtes d'entre 26 i 63 milles nàutiques
- Rutes llargues d'entre 215 i 225 milles nàutiques
- Estpancies a port d'entre 11 i 17 hores
- Distàncies totals d'unes d'entre 600 i 700 milles nàutiques

2.2.3 Conclusions

Aquests tipus de vaixells estan destinats a recórrer distàncies de menys de 2000 milles nàutiques amb petits recorreguts d'entre unes 50 milles nàutiques i unes 250 milles nàutiques.

2.3 Necessitats propulsives

En aquest apartat es calcularan totes les dades necessàries en relació a la propulsió del vaixell. Per tal de poder determinar i dimensionar tota la maquinaria del sistema propulsiu és necessari saber la velocitat de servei que es vol tenir i els tipus de propulsors que s'utilitzaran amb la potència, velocitat rotativa i parell mecànic corresponents.

Les dimensions i geometria de les hèlixs, eixos i l'espai on es troben no es pretenen modificar ja que això comportaria canviar molts paràmetres de les formes del vaixell. Simplement es volen calcular les revolucions dels propulsors per a cada velocitat del vaixell i el par mecànic necessari.

L'únic paràmetre que es modificarà serà el pas de les hèlixs ja que, aquestes, són de pas variable dissenyades per un sistema propulsiu de combustible convencional. Per al sistema propulsiu híbrid que es vol dissenyar són més eficients les hèlixs de pas fixa i, per tant, s'optimitzarà la relació pas-diàmetre més òptima.

També es calcularà la velocitat de servei òptima, depenent de la resistència per la formació d'onades, dins del rang de velocitats en les que es vol navegar.

Pel que fa als propulsors de proa, el vaixell té 2 hèlixs amb un diàmetre de 1,5 metres. Per aquests 2 propulsors es necessitarà un motor elèctric de com a mínim 500 kW per a cada un segons les demandes de maniobrabilitat ja calculades. Per tant no es necessitarà cap càlcul addicional.

2.3.1 Dades inicials

El creuer de luxe en qüestió està dissenyat per navegar mitjançant la propulsió de 2 hèlixs de pas variable. Cada hèlix consta de 5 pales per tal de minimitzar les vibracions resultants ja que es tracta d'un vaixell de passatge. També es coneixen les següents dades:

- Relació d'àrees AE/AO: 0,815
- Diàmetre de cada hèlix: 3,5 metres

- Coeficient de succió (t): 0,124
- Coeficient d'estela (w): 0.115
- Rendiment mecànic (η_m): 0,98
- Rendiment rotatiu-relatiu (η_{rr}): 0,96

2.3.2 Resistència a l'avanç i la potència per a cada velocitat

v (kn)	Fr	Re	R_{apend} (N)	R_{olas} (N)	R_{bulbo} (N)	R_{visc} (N)	R_{spi} (N)	R_{corr} (N)	R_{total} (N)	EHP (CV)
1	0,015	53344986	226,4	0,0	1,8	846,4	0,0	180,6	1411,3	1,0
2	0,030	106689972	821,1	0,0	14,0	3056,1	0,0	722,4	5177,1	7,2
3	0,044	160034959	1748,9	0,0	46,9	6491,4	0,0	1625,3	11109,5	23,3
4	0,059	213379945	2993,5	0,0	110,1	11089,1	0,0	2889,5	19127,1	53,6
5	0,074	266724931	4544,5	0,0	212,4	16808,1	0,0	4514,8	29179,3	102,1
6	0,089	320069917	6394,2	0,4	361,5	23618,0	0,0	6501,4	41230,6	173,1
7	0,104	373414904	8536,3	5,1	564,0	31495,2	0,0	8849,1	55257,3	270,7
8	0,118	426759890	10965,9	35,0	825,2	40420,1	0,0	11558,0	71257,7	399,0
9	0,133	480104876	13678,9	160,5	1149,2	50376,4	0,0	14628,1	89282,6	562,4
10	0,148	533449862	16671,6	550,5	1538,8	61349,9	0,0	18059,4	109483,1	766,3
11	0,163	586794848	19940,8	1524,4	1995,5	73328,2	0,0	21851,9	132162,3	1017,5
12	0,178	640139835	23483,7	3589,9	2519,6	86300,3	0,0	26005,5	157812,7	1325,5
13	0,192	693484821	27297,7	7453,6	3110,8	100256,3	0,0	30520,4	187126,0	1702,7
14	0,207	746829807	31380,7	14034,9	3767,6	115187,2	0,0	35396,4	221007,2	2165,6
15	0,222	800174793	35730,4	24269,8	4487,9	131084,8	0,0	40633,6	260378,5	2733,7
16	0,237	853519780	40344,9	39115,4	5269,2	147941,5	0,0	46232,0	306183,4	3428,9
17	0,252	906864766	45222,5	61268,4	6108,2	165750,5	0,0	52191,6	361105,5	4296,7
18	0,266	960209752	50361,5	93086,1	7001,7	184505,2	0,0	58512,4	427489,5	5385,8
19	0,281	1013554738	55760,3	131523,2	7946,1	204199,5	0,0	65194,4	502277,7	6679,6
20	0,296	1066899724	61417,5	170743,7	8937,8	224827,8	0,0	72237,5	579622,4	8113,8

Taula 1: Resistència a l'avanç per a cada velocitat

2.3.3 Càlculs

Es calcularà la velocitat òptima del vaixell amb les corresponents revolucions dels propulsors i la relació pas-diàmetre.

Es pretén que el vaixell navegui entre 16 i 17 nusos de velocitat de servei i, per això, es calcularà en quin punt hi ha menys resistència per formació d'onades mitjançant la següent fórmula.

$$V = \sqrt{\frac{\lambda \times g}{2\pi}}$$

On:

- V=Velocitat del vaixell (m/s)
- λ =Longitud d'ona
- g=gravetat

La longitud d'ona ve determinada per la divisió entre l'eslora i el coeficient de relació entre la resistència per formació d'onades i la velocitat del vaixell.

Aquest coeficient marca els punts on hi han màxims i mínims de resistència per formació d'onades. És per això que, mitjançant aquest coeficient i aquesta fórmula, es pot determinar quina velocitat és la més òptima d'entre el rang seleccionat sabent el punt on està el mínim.

Dins del rang d'entre 16 i 17 nusos la velocitat amb menys resistència per formació d'onades és 17 kn ja que el coeficient en qüestió determina que en aquest punt hi ha un mínim i per tant serà la velocitat òptima de servei.

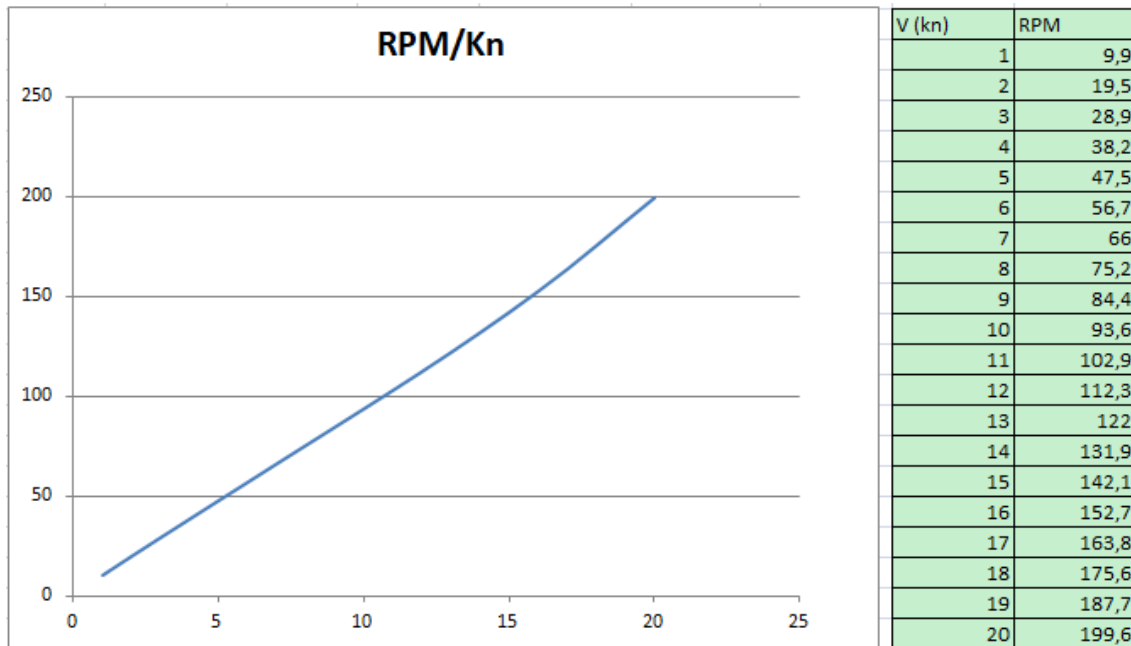
Un cop calculada la velocitat i sabent les dades inicials dels propulsors i la resistència total a l'avanç, es calcularà la relació pas-diàmetre (P/D) i les revolucions dels propulsors (rpm) més òptimes mitjançant els càlculs de la Sèrie Sistemàtica B de Troost (NSMB Wageningen). Aquesta sèrie utilitza els coeficients K_T i K_Q per tal de realitzar tots els càlculs.

Primer s'establirà la resistència total a l'avanç que han de vèncer els 2 propulsors per la velocitat de 17 kn i es calcularan els valors de (P/D) i rpm que maximitzen el rendiment total propulsiu. Un cop calculat, es fixarà la relació (P/D) i s'aniran calculant els diferents valors de les rpm que maximitzen el rendiment propulsiu i vencen la resistència total a l'avanç per a cada velocitat d'entre 1 i 20 kn.

Els resultats són els següents:

- Relació P/D òptima: 1,086
- Rpm per a 17 kn: 163,8 rpm

Rpm de cada propulsor per a cada velocitat:



Gràfica 1: RPM / Velocitat kn

Seguidament es calcularan el par (Q) necessaris en les hèlixs mitjançant la següent fórmula perquè en cada velocitat es puguin generar les rpm corresponents. S'obtindrà la corba par-velocitat dels propulsors.

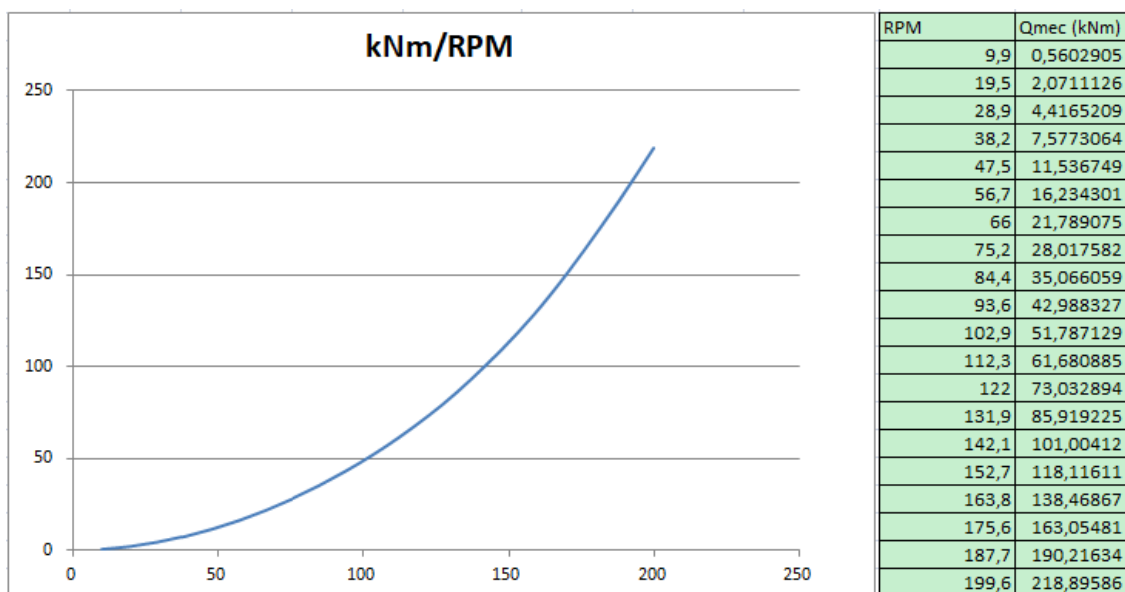
$$Q = K_Q \rho n^2 D^5$$

On:

- Q=Par necessari en l'hèlix (kNm)
- K_Q =Coeficient del par
- ρ =Densitat de l'aigua del mar
- n =Revolucions de l'hèlix
- D =Diàmetre de l'hèlix

Com s'ha mencionat anteriorment en les dades inicials, existeix un rendiment mecànic i rotatiu-relatiu ja que hi ha pèrdues mecàniques des dels motors fins a les hèlixs. És per això que s'han de dividir aquests rendiments pels par (Q) calculats.

Els resultats dels pars (Q) que ha de subministrar cada hèlix per a cada velocitat són els següents:



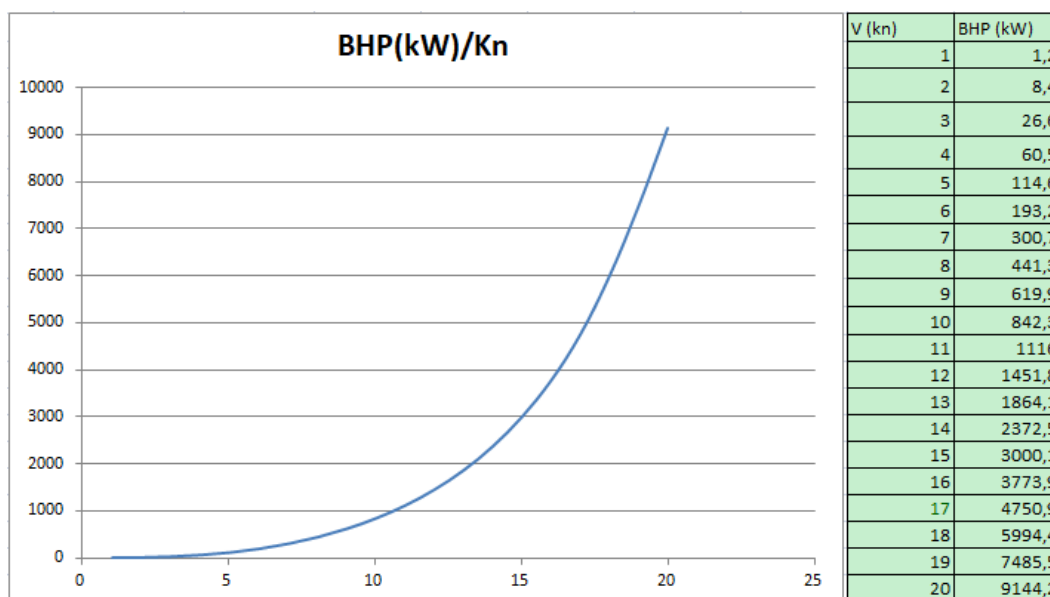
Gràfica 2: Par kNm / RPM

Un cop es tenen totes aquestes dades, es pot calcular la potència propulsiva total BHP necessària que han de subministrar els 2 motors per a cada velocitat (per això es multiplicarà per 2). S'utilitzarà la següent fórmula:

$$BHP = \frac{2\pi K_Q \rho \frac{n^3}{60} D^5}{1000 \times \eta_m \eta_{rr}} \times 2$$

- BHP=Potència propulsiva necessària (kW)
- K_Q =Coeficient del par
- ρ =Densitat de l'aigua del mar
- n =Revolucions de l'hèlix
- D =Diàmetre de l'hèlix
- η_m =Rendiment mecànic
- η_{rr} =Rendiment rotatiu-relatiu

Resultats:



Gràfica 3: Potència BHP / Velocitat kn

Amb aquests resultats es pot determinar que la potència i el par necessaris per navegar a la velocitat de servei són de 4751 kW i 138,5 kNm com a mínim.

Per navegar a port, i per tant, únicament utilitzant electricitat i a 7 nusos, la potència i el par necessaris són de 301 kW i 20,5 kNm com a mínim.

Aquesta potència estarà repartida entre 2 motors que cada un d'ells haurà de generar el par mínim mencionat.

A continuació es mostrarà la taula amb tots els resultats anteriors marcant de color groc les 2 velocitats (velocitat de servei i en port) a estudiar.

V (kn)	rpm	η_0	KQ	KT	Q (kNm)	Qmec (kNm)	BHP (kW)	BHP (kW) / 2
1	9,9	0,6643	0,036	0,1913	0,527121302	0,5602905	1,2	0,6
2	19,5	0,6815	0,0343	0,1741	1,948502738	2,071112604	8,4	4,2
3	28,9	0,6913	0,0333	0,1783	4,155062843	4,416520879	26,6	13,3
4	38,2	0,698	0,0327	0,1753	7,128729835	7,577306372	60,5	30,25
5	47,5	0,7031	0,0322	0,173	10,85377386	11,53674942	114,6	57,3
6	56,7	0,7072	0,0318	0,1713	15,27323083	16,23430148	193,2	96,6
7	66	0,7106	0,0315	0,1698	20,49916176	21,789075	300,7	150,35
8	75,2	0,7136	0,0312	0,1686	26,35894069	28,01758151	441,3	220,65
9	84,4	0,716	0,031	0,1677	32,99014806	35,06605874	619,9	309,95
10	93,6	0,718	0,0309	0,1671	40,44341823	42,9883272	842,3	421,15
11	102,9	0,7196	0,0308	0,1669	48,72133095	51,78712898	1116	558
12	112,3	0,7205	0,0308	0,1672	58,02937682	61,68088522	1451,8	725,9
13	122	0,7209	0,0309	0,1682	68,70934657	73,03289389	1864,1	932,05
14	131,9	0,7204	0,0311	0,17	80,83280651	85,91922461	2372,5	1186,25
15	142,1	0,7191	0,0315	0,1725	95,02467376	101,0041175	3000,1	1500,05
16	152,7	0,7171	0,0319	0,1757	111,1236338	118,1161074	3773,9	1886,95
17	163,8	0,7138	0,0325	0,1799	130,2713259	138,4686713	4750,9	2375,45
18	175,6	0,7091	0,0333	0,1853	153,4019691	163,0548141	5994,4	2997,2
19	187,7	0,7042	0,034	0,1906	178,9555368	190,2163444	7485,5	3742,75
20	199,6	0,7003	0,0346	0,1946	205,9372221	218,8958569	9144,2	4572,1

Taula 2: Resultats de les necessitats propulsives

Capítol 3. Resum de la normativa a tenir en compte

En aquest apartat es resumiran tots aquells apartats de la normativa de la societat de classificació DNV-GL que cal tenir en compte pel disseny d'una planta elèctrica i un sistema propulsiu híbrid amb bateries per a un vaixell de passatge.

3.1 Propulsió elèctrica

Pt 4 Ch 8 Electrical Installations Sec 12 Electric Propulsion

1) General:

- a) Els requeriments d'aquesta secció són complementaris als de les seccions 2 i 11 i aplica a sistemes propulsius on la propulsió principal és produïda per motors elèctrics.
- b) Generadors:
 - i) La instrumentació i la monitorització ha de complir segons el *Ch 3 Sec 1* sobre les alarmes i indicadors.
 - ii) El sistema de seguretat ha de comptar amb un generador auxiliar.
- c) Estan considerats generadors principals aquells que contribueixen al subministrament de potència per a la propulsió. En cas contrari es consideren generadors auxiliars.
- d) Els sistemes de control local i control remot han de complir amb les normes generals.
- e) La instrumentació i la automatització ha de complir amb els requeriments del *Ch 1 i Ch 9*.

2) Disseny del sistema:

- a) El sistema propulsiu elèctric ha d'estar dissenyat segons els modes d'operació definits del vaixell i, aquests, han de complir amb els requeriments d'aquesta secció.
- b) És responsabilitat del constructor assegurar la integritat tècnica de la propulsió segons:
 - i) Les configuracions dels dispositius de protecció dels generadors, transformadors i motors propulsius han d'estar coordinades amb les configuracions del sistema elèctric de control.
 - ii) Els requeriments del *Ch 1 Sec 4 1.4.8* referents a alarma, alleugeriment i tall de corrent s'han de complir.
 - (1) *Ch 1 Sec 4 1.4.8*: El sistema automàtic d'alarmes ha de controlar, monitoritzar, avisar, alertar i fer accions de seguretat com reduir o parar la propulsió, mentre proporciona la informació a la tripulació i permet la seva intervenció manual sempre i quan es pugui.

- c) La maquinaria instal·lada en línia, construïda amb redundància, no pot tenir fallades comunes i sotmetre el vaixell a la pèrdua de maniobrabilitat excepte si és per incendi o inundació.
- d) Els cables de cada unitat de propulsió com els motors han d'estar separats d'altres unitats del sistema.
- e) La redundància de cada funció principal ha de complir amb *Ch 1 Sec 3 2.3*
 - i) *Ch 1 Sec 3 2.3*:
 - (1) Els sistemes han de tenir la suficient redundància perquè qualsevol fallada d'un component actiu d'aquests no causi la pèrdua d'alguna funció principal durant el període de temps especificat a l'apartat 2.3.6.
 - (a) Els components actius segons la *Sec 1 Table 1* són components per la transmissió mecànica de potència com bombes, ventiladors, motors elèctrics, generadors, motors de combustió i turbines.
 - (b) Les funcions principals segons la *Part 1 Ch 1 Sec 1 Table 2* són:
 - (i) Rigidesa estructural
 - (ii) Estanquitat
 - (iii) Generació de potència
 - (iv) Propulsió
 - (v) Direcció
 - (vi) Drenatge i bombeig de sentina
 - (vii) Llast i ancoratge
 - (2) Les funcions principals realitzades per un sol sistema han de tenir la redundància suficient perquè qualsevol fallada d'un component actiu no causi la pèrdua d'aquella funció.
 - (3) Les funcions principals realitzades per varis sistemes que en cas de fallada d'un component actiu permeten seguir realitzant la funció amb almenys el 40% de la capacitat, no és necessari la duplicació. Un clar exemple són els sistemes propulsius amb 2 motors o més que permeten el subministrament d'almenys el 40% de la potència en cas de fallada d'un dels elements.
 - (4) Els següents elements actius són excepcions sobre la normativa de la redundància i per tant no han d'estar duplicats:
 - (a) Motor principal
 - (b) Eix, engranatge i unitat de direcció i propulsió com els propulsors
 - (c) Ancora
 - (d) Maquinària d'emergència
 - (e) Propulsors auxiliars de maniobra
 - (5) Components i sistemes que duen a terme funcions principals han de tenir redundància de tipus 2.

Quan la interrupció d'una funció suposa perill considerable per altres components o sistemes o pel vaixell, s'establirà redundància de tipus 1. Components i sistemes que duen a terme la funció de propulsió han de tenir redundància de tipus 1.

<i>redundancy types</i>	defined by the time lag accepted upon restoring a lost function, due to failure in a component or system, designed with redundancy	
	<i>Redundancy type</i>	<i>Time lag in re-establishment of function</i>
	0	None (continuously available)
	1	Up to 30 s
	2	Up to 10 minutes
	3	Up to 3 hours
	<i>not defined</i>	More than 3 hours

Taula 3: Tipus de redundàncies Font: DNV-GL

- (6) S'accepta major temps de restauració per funcions principals on alguns components tenen una possibilitat molt baixa de fallada i es permet la no duplicació.
 - (7) Els components actius duplicats han d'estar dimensionats de tal forma que la funció principal es pugui seguir duent a terme amb normalitat.
 - (8) Quan 2 més components realitzen la mateixa funció han d'estar separats i poder ser posats en marxa en quan sigui necessari.
 - (9) Les tasques de manteniment es preveuen realitzar regularment.
 - (10) El canvi de qualsevol mode de navegació ha de ser possible sense cap interrupció en la propulsió o la direcció.
 - (11) Els elements que tenen control remot també han de disposar de control alternatiu auxiliar.
 - (12) El sistema de propulsió ha de ser capaç de mantenir, en règim de navegació normal, el 70% de les revolucions nominals de servei sense cap problema.
 - (13) El sistema d'emergència ha de poder estar disponible en qualsevol moment i poder restablir el sistema propulsiu, en cas de caiguda de planta, en menys de 30 minuts.
 - (14) El sistema d'emergència ha d'estar dimensionat segons la demanda propulsiva instal·lada.
 - (15) En cas de fallada de qualsevol component, aquest, ha d'entrar en mode de fallada i no suposar cap perill pel vaixell, tripulació i passatge i medi ambient.
 - (16) La probabilitat de que la fallada d'un component malmeti un altre s'accepta que sigui molt baixa.
 - (17) La fallada d'un component no ha de suposar un impediment en resetejar el sistema o utilitzar altres components en paral·lel.
- f) Tots els modes operatius han d'estar dissenyats perquè qualsevol fallada de qualsevol element del sistema no afecti permanentment a la propulsió del vaixell. Han d'estar dissenyats amb redundància tipus R1.
 - g) Vaixells amb 2 o més motors elèctrics propulsius i convertidors han de poder ser desconnectats sense afectar a la resta de components assegurant que es manté la propulsió i la maniobrabilitat. Està acceptat que la potència propulsiva pugui ser reduïda sempre i quant sigui la suficient per tenir seguretat.
 - h) Els requeriments generals sobre ventilació i refrigeració de la maquinària establerts en la Sec 2 impliquen que qualsevol pèrdua de ventilació o refrigeració, en espais on és forçada, no ha de causar la pèrdua de propulsió.

Ha d'haver un mínim de propulsió per assegurar la correcta maniobrabilitat del vaixell després de qualsevol fallada d'aquest sistema.

- 3) Capacitat del sistema:
 - a) El par disponible als propulsors ha de ser adequat perquè el vaixell pugui ser maniobrat, parat i posat en marxa inversa quan aquest va a màxima velocitat.
 - b) Ha d'haver un cert marge de seguretat del par que permeti el correcte funcionament del motor en condicions de mal temps.
 - c) Ha d'haver suficient par perquè el vaixell pugui ser arrencat en qualsevol situació meteorològica.
 - d) El sistema ha de tenir el suficient marge de sobrecàrrega per subministrar suficient par, potència i potència reactiva durant condicions d'arrencada, maniobrabilitat i parada d'emergència.
- 4) Sistema de subministrament elèctric:
 - a) El sistema de subministrament elèctric ha de complir segons la Sec 2.
 - b) Les variacions de freqüència s'han de mantenir dins del límit de la Sec 2. Durant maniobres d'emergència està acceptat que les variacions de voltatge i freqüència excedeixin dels límits, sempre i quant no malmetin qualsevol component del sistema.
- 5) Sistemes de protecció i control:
 - a) Qualsevol fallada del sistema d'excitació dels generadors que pugui ser perillós per la maniobrabilitat del vaixell ha d'estar controlat per un sistema que retorni automàticament la maquinària en un mode d'operació segur. La fallada ha d'estar detectada juntament amb un dispositiu d'alarma al pont de comandament i a la sala de màquines que permeti avisar a la tripulació.
 - b) Qualsevol dispositiu de protecció de regulació de voltatge ha de ser desactivat o ajustat automàticament.
 - c) Els dispositius de protecció han d'estar configurats perquè permetin la sobrecàrrega en condicions normals en les que es permeti (ex: maniobrar en condicions extremes).
 - d) Les següents alarmes i sistemes de monitorització han d'estar instal·lats:
 - i) Fallada en subministrament de potència
 - ii) Fallada en el sistema de control
 - iii) Fallada de la velocitat
 - iv) Fallada de valors nominals
 - v) Fallada del sistema d'alimentació
 - e) Les fallades i les causes han de poder ser comunicades i identificades.
 - f) Les fallades en el sistema d'excitació dels motors elèctrics han de ser senyalades per una alarma.
 - g) A més de les proteccions de la Sec 2 7.5 sobre els motors també s'han d'afegir:
 - i) Protecció de sobre velocitat
 - ii) Proteccions sobre fallades internes
 - iii) Protecció de presa de terra
 - h) Els motors han de disposar d'un disconnectador manual entre aquests i els convertidors de freqüència.

6) Sistemes de control:

- a) Els sistemes de propulsió elèctrics han d'estar equipats amb dispositius de control locals. Significa que s'han d'instal·lar dispositius de control independents en la mateixa planta propulsora a part dels de control remot del pont de comandament.
- b) Qualsevol fallada del sistema de control remot de la propulsió no ha de suposar cap canvi apreciable en la propulsió del vaixell ja que no ha de prohibir el control pel sistema de control local.
- c) El sistema de control remot ha d'estar limitat quan el sistema propulsiu no està adequat per subministrar la potència que es requereix. Ha de ser un dispositiu automàtic.
- d) Qualsevol fallada del sistema no ha de suposar que els propulsors augmentin la velocitat perillosament, que no s'inverteixi la velocitat o qualsevol altre condició perillosa. També s'aplica a la maquinària generadora de potència.
- e) Els dispositius de parada d'emergència han d'estar en totes les localitzacions de control i han de ser independents dels dispositius de parada normal. Ha d'haver un per a cada motor propulsiu.
- f) L'empenta propulsiva no ha de canviar significativament en quant es modifica el mode de control de la velocitat en altres condicions de navegació.
- g) La potència propulsora ha d'estar limitada o reduïda en quant hi ha sobrecorrent, baixada del voltatge, baixada de la freqüència, potència inversa o sobrecàrrega.
- h) Quan es limita la propulsió a causa de que els generadors han assolit el seu màxim no s'ha de establir cap alarma d'avís.
- i) Ha d'haver un sistema de bloqueig inicial automàtic en el cas de que es detecti un defecte que pugui desencadenar danys per a la propulsió.
- j) El sistema de generació i distribució elèctrica ha d'estar equipat amb un sistema automàtic de control que tingui, com a mínim, les següents funcions:
 - i) Assegurar que el sistema consta de la suficient potència per la correcta maniobrabilitat en tot moment inhibint la desconexió dels generadors en condicions de maniobra si és necessari.
 - ii) En condicions de maniobra, cada secció elèctrica del sistema ha de poder ser alimentada correctament.
 - iii) Executar una reducció de la generació de potència quan la planta està sobrealimentada.
 - iv) Assegurar que es subministra la potència necessària per una maniobrabilitat segura en quant un dels generadors ha caigut.
 - v) Si un dispositiu de control automàtic de la planta elèctrica falla no ha de suposar la prohibició de parada o arrencada de qualsevol generador en quant es requereixi.
 - vi) Controlar la màxima potència dels motors
- k) El sistema de control ha de tenir una alarma per quan no es pot subministrar la potència adequada.
- l) El sistema de control ha de fallar mantenint la seguretat. Significa que qualsevol fallada no ha de bloquejar el subministrament de potència.

- m) En els motors elèctrics i generadors han de tenir indicadors directes de temperatura en la sala de màquines.
- n) En la sala de màquines s'han de poder observar els valors de les diferents corrents dels motors i generadors.
- o) Els dispositius de seguretat no han d'aplicar una parada total si no és estrictament necessari, acceptant una reducció de la potència propulsiva.
- p) Les parades d'emergència causades per dispositius de seguretat han d'estar, sempre que sigui possible, avisades per alarmes prèviament.
- q) Les alarmes crítiques han d'estar en el pont de comandament com diu *Ch 1 Sec 4 1.4.8*
- r) La monitorització amb alarma ha d'estar per:
 - i) Temperatures elevades en màquines amb refrigeració forçada
 - ii) Temperatures elevades en motors, generadors i transformadors
 - iii) Pèrdua de corrent de ventilació on aquesta és forçada o no.
 - iv) Temperatures de rodaments en motors i generadors superiors a 1500 kVA
 - v) Rodaments lubricats han de ser controlats per una correcta lubricació. Control de la temperatura i el nivell d'aquests (també visual).
 - vi) Fuites d'aigua refrigerant
 - vii) Fallada de les preses de terra
 - viii) Fallades en els filtres
 - ix) Pujades i baixades de voltatge i freqüència
- s) Un avís de reducció automàtica o manual de la potència ha de ser mostrada visualment o acústicament en el pont de comandament en el cas de que:
 - i) Baixa pressió de lubricació en els motors i generadors
 - ii) Alta temperatura de l'aire de ventilació en els generadors, transformadors i motors
 - iii) Fallada en algun sistema de refrigeració
- t) Per cada generador ha d'haver un mesurador del factor de potència i de la potència reactiva.
- u) En la sala de màquines i en el pont de comandament han d'haver instruments que indiquin la potència que es consumeix i la potència disponible per la propulsió.
- v) Totes les indicacions essencials pel control propulsiu han d'estar, també, en la sala de màquines

3.2 Sistemes i equipaments

Pt 5 Ch 4 Passenger ships Sec 3 Systems and equipment

- 1) Sistemes elèctrics:
 - a) Han de tenir una instal·lació elèctrica segons la *Pt 4 Ch 8*
 - b) Quan la font d'energia elèctrica d'emergència és un generador, aquest, ha de posar-se en marxa automàticament. El sistema d'emergència ha de tenir una capacitat de subministrament de 36 hores per poder alimentar el serveis llistats en *Pt 4 Ch 8 Sec 2 Table 1*.

- i) *Pt 4 Ch 8 Sec 2 Table 1:*
 - (1) Llums d'emergència
 - (2) Llums de navegació
 - (3) Bombes d'incendis
 - (4) Sistemes d'extinció d'incendis
 - (5) Sistema de direcció
 - (6) Portes estanques
 - (7) Barques salvavides
 - (8) Estabilitzadors
 - (9) Sistemes de comunicació
 - (10) Sistemes de navegació
 - (11) Sistemes d'alarma
- c) A més dels serveis llistats en *Pt 4 Ch 8 Sec 2 Table 1*, el següents serveis també han d'estar subministrats pel sistema d'emergència:
 - i) Per un període de 36 hores:
 - (1) Luminària d'emergència
 - (2) Sistemes de comunicació públics dels que disposen el passatge en les habitacions i espais comuns
 - (3) Sistemes de comunicació entre el pont de comandament i el sistema de control d'incendis
 - (4) Els sistemes de portes automàtiques d'incendi
 - (5) Bombes d'aigua d'incendis
 - (6) Bomba de sentines i totes les vàlvules de les sentines
 - ii) Per un període de 30 minuts
 - (1) Sistemes d'elevació d'embarcacions d'emergència

3.3 Disseny del sistema

Pt 4 Ch 8 Electrical Installations Sec 2 System Design

- 1) Principis de disseny:
 - a) Els sistemes elèctrics de potència es divideixen en:
 - i) Sistema elèctric principal
 - ii) Sistema elèctric d'emergència
 - iii) Sistema elèctric de transició
 - iv) Consumidors individuals amb bateries particulars d'emergència
 - b) El sistema elèctric principal ha de ser un sistema redundant i independent de qualsevol altre sistema d'abord.
 - c) El sistema elèctric d'emergència no ha de ser redundant però normalment sí que ha de ser independent al principal.
 - d) El sistema elèctric de transició és un complement del sistema elèctric d'emergència.

- e) Les bateries individuals per a segons quins sistemes es contemplen com a sistema d'emergència.
- f) Tots els consumidors que han d'estar operatius en cas d'emergència, han d'estar alimentats per un sistema independent al principal.
- g) Condicions ambientals:
 - i) Temperatura de l'aire:
 - ii) **Table 2 Air temperature**

Installations, components	Location, arrangement	Temperature range [°C]
Machinery and electrical installations ²⁾	In enclosed spaces	0 to 45 ¹⁾
	On machinery components, boilers	According to specific local conditions
	In spaces, subject to higher or lower temperatures	
	On the open deck	-25 to +45 ¹⁾

Taula 4: Temperatura ambiental Font: DNV-GL

- ii) Si les temperatures ambientals excedeixen aquests valors, s'han de prendre mesures de modificació de la maquinaria.
- iii) Temperatura de l'aigua refrigerant:

Table 1 Water temperature

Coolant	Temperature [°C]
Seawater	+32 ¹⁾
Charge air coolant inlet to charge air cooler	+32 ¹⁾

Taula 5: Temperatura de l'aigua refrigerant Font: DNV-GL

- iv) Els sistemes han de funcionar perfectament amb humitats de fins al 95%.
- h) Voltatges i freqüències:
 - i) Màxim voltatge per sistemes connectats permanentment: 17,5 kV
 - ii) Màxim voltatge per sistemes connectats intermitentment: 1 kV
 - iii) Lluminiària i espais de acomodació per a persones: 250 V
 - iv) Màxim voltatge per sistemes de control: 1 kV
 - v) La variació de voltatge de la planta principal ha d'estar dins de $\pm 2,5\%$
 - vi) La variació de voltatge del sistema d'emergència ha d'estar dins de $\pm 3,5\%$
 - vii) La variació del voltatge DC de les bateries ha d'estar dins de $\pm 25\%$
 - viii) Variació màxima d'entre 95 i 105% de la freqüència.
 - ix) En instal·lacions dissenyades amb sistemes de variació de freqüència es pot operar dins dels límits dels components.
- 2) Sistema elèctric principal de potència:
 - a) El sistema elèctric principal ha d'estar dissenyat per alimentar tots els consumidors del vaixell sense haver d'utilitzar el sistema d'emergència en cap moment. Excepcions són els consumidors destinats a situacions d'emergència.
 - b) El sistema principal ha de comptar amb redundància en components com fonts de potència, transformadors i convertidors per ser capaç de seguir subministrant corrent en cas de fallada d'algun d'aquests components en els següents serveis:
 - i) Serveis propulsius i de seguretat.
 - ii) Serveis d'arrencada dels motors.

- iii) Serveis mínims d'habilitació (cuinar, calefacció, refrigeració, aigua, etc).
- iv) Components duplicats que estan accionats un mecànicament i l'altre elèctricament.
- v) Per restaurar la planta del vaixell en cas de caiguda.
- c) Fonts d'energia:
 - i) Les fonts principals d'energia han de ser generadors, celes de combustible, celes fotovoltaïques o bateries. Cada font ha de ser independent.
 - ii) Qualsevol generador principal ha d'estar dissenyat per treballar en qualsevol condició de navegació i meteorològica del vaixell.
 - iii) Qualsevol generador ha de ser avaluat per complir en:
 - (1) Viable en qualsevol condició de navegació.
 - (2) Voltatge i freqüència de sortida estables.
 - (3) Proteccions adequades.
 - (4) Sistemes propis auxiliars com ventilació, refrigeració, etc.
 - iv) Almenys 2 fonts d'energia principals han d'estar en diferents embarrats elèctrics
 - v) Quan s'utilitza energia elèctrica per engegar motors/generadors, les bateries que subministren aquest corrent s'han de dividir en 2 grups connectades independentment i que cada un d'aquests pugui engegar el motor. S'han de connectar amb un commutador que permeti connectar un grup o l'altre. Aquestes bateries han d'estar instal·lades en el mateix lloc que els motors. Cada bateria ha de poder subministrar 3 possibles arrencades per cada motor en plantes on hi ha més d'un motor (suma total màxima de 12 arrencades). En el cas dels motors/generadors d'emergència han de tenir una bateria a part capaç de subministrar 3 arrencades.
 - vi) Quan la planta elèctrica cau s'ha de poder restaurar amb el sistema elèctric d'emergència.
- 3) Sistema elèctric d'emergència:
 - a) El sistema elèctric d'emergència ha de poder subministrar suficient potència per a aquells elements essencials del vaixell (mencionats anteriorment).
 - b) La font d'emergència s'ha de connectar automàticament en cas de fallada del sistema principal en menys de 45 segons i en qualsevol condició meteorològica.
 - c) Tots aquells consumidors no essencials subministrats pel sistema d'emergència hauran de ser desconnectats automàticament en el cas de que es sobrecarregui la font d'emergència.
 - d) El quadre d'emergència ha d'estar el més pròxim possible a la font d'energia d'emergència i als components del propi sistema i ha de poder ser accessible des de coberta.
 - e) El quadre d'emergència ha d'estar subministrat pel quadre principal connectat per un connector automàtic que es desconnecta en cas de fallada del sistema principal.
 - f) El quadre d'emergència ha d'estar dissenyat seguint els mateixos aspectes tècnics que el quadre principal.
 - g) No es poden instal·lar bateries en el mateix lloc que el quadre d'emergència, excepte aquelles per engegar la font d'emergència.

- h) La ventilació i refrigeració del sistema ha de ser la correcta igual que la dels sistema principal.
- i) El sistema d'emergència no es pot utilitzar en condicions normals excepte per accions excepcionals com manteniment.
- j) Els cables del sistema d'emergència han d'estar integrament dins del mateix espai que aquest.
- k) Font de transició:
 - i) És necessària quan el sistema d'emergència triga en connectar-se més de 45 segons o es tracta d'un vaixell de passatge.
 - ii) Consisteix en bateries localitzades en el propi sistema d'emergència. Es poden utilitzar aquelles que ja estan dissenyades per subministrar energia als consumidors.
 - iii) Les bateries han de poder ser carregades pel sistema d'emergència i tenir suficient capacitat per subministrar energia als elements essencials (mencionats anteriorment).
- l) Generadors d'emergència:
 - i) Han d'estar subministrats per un sistema independent de combustible i amb sistemes auxiliars independents com el de refrigeració i lubricació.
 - ii) Han d'engegar-se automàticament en cas de caiguda del sistema principal.
 - iii) Les funcions de protecció han de ser les mateixes que pels generadors principals.
 - iv) Han de poder engegar-se a 0°C.
 - v) El sistema d'arrencada per bateries mencionat anteriorment que ha de permetre 3 arrencades com a mínim, ha d'estar sempre carregat i ser accionat pel quadre d'emergència i localitzat en el mateix lloc. Les bateries han de ser exclusivament pel generador d'emergència.
 - vi) Poden ser utilitzats a port si és necessari.
- 4) Sistema de bateries:
 - a) La capacitat de les bateries ha de ser calculada en relació al temps de duració i a la potència que es vol subministrar.
 - b) Cada bateria ha de tenir el seu propi sistema de càrrega.
 - c) Han de poder subministrar la capacitat desitjada suposant que es troben al 80% de la seva capacitat.
 - d) Cada bateria s'ha de poder carregar fins al 80% en menys de 10 hores en condicions normals.
 - e) Els sistemes de càrrega han de poder carregar la bateria al màxim.
 - f) Normatives addicionals sobre bateries estan la *Pt 6 Ch 2 Sec 1*
- 5) Distribució de l'energia:
 - a) Cada grup consumidor ha de tenir el seu circuit de subministrament propi i ha d'estar connectat al quadre principal per almenys 2 seccions diferents.
 - b) Qualsevol fallada d'algun dels sistemes d'energia entrant o sortint al quadre principal no pot produir pèrdua de maniobrabilitat del vaixell o disfunció de qualsevol altre sistema.
 - c) Cada connexió al quadre principal ha de poder ser desconnectada de manera segura amb les proteccions adequades.

- d) Cada sistema essencial ha d'estar connectat per almenys 2 seccions al quadre principal.
 - e) El quadre principal de distribució ha d'estar dividit en almenys 2 parts equilibrades de manera que:
 - i) El grup de generadors i altres grups duplicats han d'estar dividits de manera equilibrada.
 - ii) La fallada d'una de les parts del quadre de distribució no ha de suposar que l'altre o altres parts quedin inutilitzades i es vegi afectada la maniobrabilitat més de 10 minuts.
 - f) Les diferents parts del quadre principal han d'estar connectades per un commutador que permeti connectar i desconnectar quan és necessari.
 - g) La lluminària del sistema ha d'estar dividida i connectada en:
 - i) Lluminària principal connectada al quadre principal.
 - ii) Lluminària d'emergència connectada al quadre d'emergència.
 - iii) Lluminària de transició connectada al grup de bateries.
 - h) No ha de ser possible desconnectar la lluminària d'emergència. Sempre ha d'haver un nivell mínim de llum en cas d'evacuació.
 - i) Les llums han d'anar a màxima intensitat en cas de:
 - i) Pèrdua de la planta principal.
 - ii) Pèrdua de la planta d'emergència.
 - iii) Encesa d'alarma d'incendis.
 - iv) Encesa d'alarma general.
 - v) Fallada en el sistema de control de lluminària (avisat per una alarma).
 - j) Les llums de navegació i el seu sistema de control han d'estar connectats a la planta principal i a la planta d'emergència. Connectats entre si per un commutador.
 - k) Les llums de navegació han de constar en un circuit separat.
 - l) Les fonts d'energia han d'estar connectades en el mateix quadre que els consumidors.
 - m) Els sistemes de control i monitorització han d'estar sempre ininterromputs en quant al subministrament de potència. És per això que requereixen de bateries.
- 6) Connexió a port de baix voltatge:
- a) La connexió del cable de subministrament ha d'estar en el quadre de distribució principal o en un quadre especial en la sala de màquines.
 - b) La connexió ha de tenir presa de terra entre el vaixell i el port.
 - c) El circuit de subministrament ha de tenir un interruptor de desconnexió.
 - d) Qualsevol fallada en aquest circuit no ha de suposar cap afectació a la resta de la planta.
- 7) Proteccions:
- a) Proteccions que ha de tenir cada sistema, generadors, motors, transformadors, convertidors i bateries:
 - i) Proteccions de sobrecàrrega
 - ii) Proteccions de presa de terra dels components
 - iii) Proteccions de sobre voltatge
 - iv) Proteccions de curtcircuit

- v) Les proteccions del sistema s'han d'activar en quant sigui necessari però sempre i quant deixant que el subministrament de potència als elements essencials i d'emergència es segueixi produint.
- 8) Instal·lacions (Sec 2 i Sec 10 del Ch 8 Pt 4):
 - a) Els equipaments elèctrics han d'estar instal·lats permanentment i de forma segura. Han de prevenir qualsevol lesió al personal quan aquests estan sent manipulats.
 - b) Han d'estar instal·lats de manera que evitin problemes electromagnètics i problemes de emissions distorsionants.
 - c) Han d'estar instal·lats i configurats segons les instruccions del fabricant.
 - d) Han d'estar localitzats en llocs accessibles i on es pugui dur a terme una correcta operació.
 - e) Tots els gasos calents resultants no han d'afectar altres elements com cables i han d'estar ben canalitzats.
 - f) Han d'estar ben ventilats i refrigerats segons les característiques del fabricant.
 - g) Quadre de distribució general, secundari i d'emergència:
 - i) Han d'estar instal·lats en llocs de fàcil accés i ben ventilats on no hi hagi proximitat amb elements que desprenen molta calor o amb possibles fuites de líquids.
 - ii) No han d'estar en llocs amb altes humitats o condensacions de líquids.
 - iii) Han d'estar situats de manera que siguin accessibles per la operativitat i el manteniment.
 - iv) Han d'estar en llocs amb una altura mínima de 2 metres i amb amplades del passadís de davant i darrera del quadre de:

Table 3

System voltage	Width of front passage		Width of passage behind	
	Unobstructed	With doors open or switchgear drawn out	Minimum free passage	Minimum free passage at frames
Below 500 V	0.8 m	0.4 m	0.6 m	0.5 m
500 V ≤ and ≤ 1000 V	0.8 m	0.4 m	0.8 m	0.6 m
Above 1000 V	1 m	0.5 m	1.0 m	0.6 m

Taula 6: Amplades dels passadissos dels quadres de control Font: DNV-GL

- v) Han d'estar al costat de sortides ràpides d'emergència.
- h) Màquines rotatives:
 - i) Han d'estar instal·lades paral·lelament a la línia de crugia.
 - ii) No han d'estar sota de canonades d'aigua, oli o combustible.
- i) Bateries:
 - i) Pt 6 Ch 2
 - ii) Han d'estar instal·lades adequadament en llocs ben ventilats.
 - iii) Han de ser accessibles pel manteniment.
 - iv) Han d'estar cobertes i protegides.
 - v) Han d'estar ben fixades a l'estructura del vaixell de manera que no es puguin moure de manera accidental.

vi) Tots els materials que composin el sistema de bateries han de ser resistents a la corrosió.

vii) No poden estar en llocs per passatgers.

viii) Càlcul sobre la ventilació:

(1) a) Calculation of battery charging power (P).

$$P = U \cdot I$$

P = calculated battery charging power [W]

U = rated battery voltage [V]

I = charging current [A] where:

$$I = 8 \cdot K/100 \text{ for lead acid batteries}$$

$$I = 16 \cdot K/100 \text{ for NiCd- batteries}$$

K = battery capacity [Ah].

If several battery sets are used, the sum of charging power shall be calculated.

b) Calculation of required ventilation flow rate:

$$Q = f \cdot 0.25 I \cdot n$$

Q = ventilation flow rate [m³/h]

n = number of battery cells in series connection

f = 0.03 for VRLA (valve-regulated lead acid battery) batteries

f = 0.11 for vented batteries.

If several battery sets are installed in one room, the sum of ventilation flow rate shall be calculated.

c) Calculation of required cross section of ventilation ducts, assuming an air speed of 0.5 m/s:

$$A = 5.6 \cdot Q$$

A = cross-section [cm²].

Il·lustració 23: Càlculs per la ventilació de les bateries Font: DNV-GL

vii) Càlcul del volum d'aire lliure:

(1) Inferiors a 2 kW:

$$V = 2.5 \cdot Q$$

V = free air volume in the room [m³]

Q = ventilation flow rate [m³/h].

Il·lustració 24: Càlculs pel volum d'aire lliure en sales de bateries Font: DNV-GL

(2) Superiors a 2 kW han d'estar instal·lades en habitacles ventilats mecànicament cap a un lloc obert. La velocitat no pot passar els 4 m/s.

viii) El sistema de ventilació per bateries ha de ser independent i amb sortida i entrada a l'exterior.

b) Cablejat:

i) Han d'estar separats de qualsevol canonada que desprengui calor.

ii) Han d'estar separats per cables d'emergència, essencials i de consumidors.

iii) Han d'estar separats entre cables de generadors, transformadors i convertidors.

9) Selecció dels cables:

a) Cables resistents al foc:

i) Sistemes d'incendi i alarma

ii) Sistemes de control de portes estanques

iii) Lluminiària d'emergència

iv) Megafonia

v) Lluminiària de plantes baixes

b) Espessor de recobriment dels cables per sistemes d'entre 250 V i 1000 V:

Nominal cross section of conductor [mm ²]	Designation of the insulating compound	
	EPR S 95 [mm]	XLPE HF90 HEPR [mm]
1.5	1.0	0.7
2.5	1.0	0.7
4 to 16	1.0	0.7
25 to 35	1.2	0.9
50	1.4	1.0
70	1.4	1.1
95	1.6	1.1
120	1.6	1.2
150	1.8	1.4
185	2.0	1.6
240	2.2	1.7
300	2.4	1.8
400	2.6	2.0
500	2.8	2.2
630	2.8	2.4

For smaller cross sections than 1.5 mm², the insulation thickness shall not be less than specified for 1.5 mm².
Table 4 is according to IEC 60092-353 for 0.6/1.0 kV cables.

Taula 7: Espessor de recobriment pels cables Font: DNV-GL

- c) Elecció dels materials d'aïllament dels recobriments:
- i) Cables sense aïllament important per a llocs on el voltatge no passa els 250 V.
 - ii) Cables amb aïllament de silicona són aplicats en instal·lacions amb altes temperatures (més de 70°C).
- d) Espessor del material conductor:
- i) Si són de coure:

Table 6 Rating of cables with copper conductors and temperature class 90°C

Nominal cross-section [mm ²]	Current rating [A] (Based on ambient temperature 45°C)					
	Single-core		2-core		3 or 4-core	
1	18		15		13	
1.5	23		20		16	
2.5	30		26		21	
4	40		34		28	
6	52		44		36	
10	72		61		50	
16	96		82		67	
25	127		108		89	
35	157		133		110	
50	196		167		137	
70	242		206		169	
95	293		249		205	
120	339		288		237	
150	389		331		272	
185	444		377		311	
240	522		444		365	
300	601		511		421	
400 500 600	DC	AC	DC	AC	DC	AC
	690	670	587	570	483	469
	780	720	663	612	546	504
	890	780	757	663	623	546

Taula 8: Espessor del material conductor per cables de coure Font: DNV-GL

ii) Si són d'alumini:

Table 7 Rating of cables with aluminum conductors and temperature class 90°C

Nominal cross-section [mm ²]	Single core	2-core	3 or 4-core
50	149	127	104
70	184	157	128
95	223	189	156
120	258	219	180
150	296	252	207
185	337	287	236
240	397	337	277
300	457	388	320
400	509	433	356

Taula 9: Espessor del material conductor per cables d'alumini Font: DNV-GL

iii) Factors de correcció:

Table 10 Correction factors for ambient temperature

Cable temperature class	Ambient temperature [°C]										
°C	35 ¹⁾	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
85	1.12	1.06	1.00	0.94	0.87	0.79	0.71	0.61	0.50	-	-
90	1.10	1.05	1.00	0.94	0.88	0.82	0.74	0.67	0.58	0.47	-
95	1.10	1.05	1.00	0.95	0.89	0.84	0.77	0.71	0.63	0.55	0.45

1) Correction factors for ambient temperature below 40°C will normally only be accepted for:

- cables in refrigerated chambers and holds, for circuits which only are used in refrigerated service
- cables on vessel with class notation restricting the service to non-tropical water.

Taula 10: Factors de correcció pel cablejat Font: DNV-GL

3.4 Instal·lacions de bateries de ió de liti

Pt 6 Ch 2 Sec 1 Electrical energy storage

1) Principis:

- Els espais on es situïn les bateries han d'estar a popa de les parets de col·lisió i amb la integritat equivalent de la resta del vaixell. Es consideren espais de sala de màquines.
- En els espais on es situïn les bateries no poden haver serveis d'altres sistemes essencials i fonts calentes o d'alt risc d'incendi.
- Ha d'haver ventilació forçada independent d'altres sistemes amb sortides d'escapament.
- Han d'haver sensors i alarmes de temperatura i ventilació en els espais on estan instal·lades les bateries, independentment dels sensors particulars de cada mòdul.
- Han d'haver sensors de gas contra incendi amb les alarmes corresponents.
- Els espais han d'estar amb portes contra incendis i amb tancada d'emergència automàtica.
- El sistema contra incendis ha de ser d'aigua i automàtic tallant el subministrament elèctric.

- h) Els mòduls de bateries han d'estar protegits amb proteccions de curtcircuit, sobrecorrent, sobrevoltatge, baix voltatge i amb interruptors que permetin aïllar elèctricament aquests. Han de tenir desconnexions d'emergència just a fora de l'espai on estan situats els mòduls i al pont de comandament.
 - i) Han de tenir alarmes en cas de fallada de càrrega o descàrrega.
 - j) Han d'haver instruccions en cas d'emergència i pel manteniment sistemàtic detallant quines accions s'han de dur a terme controlant la vida de les bateries.
 - k) Si totes les fonts d'energia són de bateries han d'haver com a mínim dos grups instal·lats en espais diferents.
 - l) S'han de poder controlar remotament i localment.
 - m) La capacitat i potència de les bateries ha de ser tal que permeti dur a terme les operacions del vaixell amb normalitat.
 - n) La capacitat, potència i vida de les bateries ha de poder ser controlada en tot moment.
 - o) En cas d'un augment de temperatura dels mòduls es donarà un avís per a procedir a la reducció de la potència.
 - p) S'ha d'instal·lar un sistema de control de l'energia (EMS) que controli la potència que es subministra mesurant la càrrega i la vida de les bateries.
- 2) Disseny del sistema de bateries de ió de liti:
- a) S'han de tenir tots els perills i riscos que hi han descrivint:
 - i) Filosofia de seguretat.
 - ii) Possible escapament de gasos.
 - iii) Risc d'incendi.
 - iv) Risc d'explosió.
 - v) Sistemes de detecció, alarma i ventilació necessaris.
 - vi) Descripció del mètode contra incendis.
 - vii) Proteccions elèctriques.
 - viii) Possibles fugues dels líquids refrigerants.
 - ix) Característiques de càrrega i descàrrega.
 - b) Cada mòdul ha de tenir les proteccions adients perquè qualsevol fallada no afecti a altres mòduls.
 - c) El sistema ha de comptar amb un connector mecànic de seguretat.
 - d) El sistema de bateries ha de comptar amb un sistema de control de les bateries que permeti controlar:
 - i) Límits de càrrega i descàrrega
 - ii) Qualsevol distorsió de l'electricitat produint una desconexió automàtica.
 - iii) Qualsevol distorsió de la temperatura produint una desconexió automàtica.
 - iv) Equilibri entre mòduls.
 - e) Cada mòdul ha de comptar amb sensors que activin alarmes generals en cas de funcionament anormal de les bateries.

Capítol 4. Estudi del sistema propulsiu més apropiat i el seu dimensionament

En aquest apartat s'estudiarà quin és el tipus de sistema híbrid dièsel-elèctric més apropiat pel tipus de vaixell en qüestió a partir de les característiques de navegació, propulsió i demanda energètica estudiades anteriorment.

També s'observaran els diferents avantatges i inconvenients dels dos tipus de sistemes propulsius dièsel-elèctric que s'han mencionat en el primer apartat i es decidirà quin és el més òptim tenint en compte que és pretén consumir el mínim de combustible possible durant la navegació i el consum zero durant l'entrada, sortida i estància a port.

4.1 Comparació dels sistemes propulsius

Tal i com s'ha explicat en el primer apartat, existeixen dos tipus de sistemes híbrids que combinen el combustible amb l'electricitat de tal manera que els vaixells que posseeixen aquests tipus de propulsió puguin ser capaços de navegar sense l'ús del combustible segons quins règims de navegació. Això és degut gràcies a l'ús de bateries que, a més, també permeten controlar pics de potència sense la necessitat d'augmentar les revolucions de les màquines de combustible com els generadors i els motors dièsel, cosa que suposaria una disminució del rendiment.

En el sistema COEOD, que combina màquines elèctriques i motors dièsel units en el mateix eix del propulsor, està pensat per vaixells que necessiten una alta demanda de potència i que realitzen rutes llargues en les que les velocitats de servei són constants en quasi tot el trajecte.

És així ja que per a velocitats constants, els motors dièsel presenten millor rendiment que els motors elèctrics acompanyats de generadors i, també, tenen una taxa de menor pes per cavall de potència que aquests.

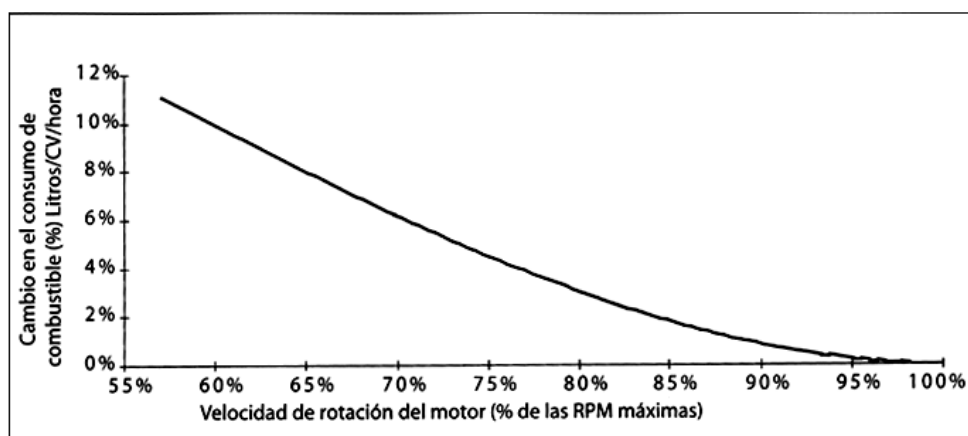
També és destacable que el cost d'instal·lació i obtenció d'un "Shaft Generator" i un motor dièsel és menor que el de motors elèctrics acompanyats de generadors.

En quant a l'altre tipus de sistema propulsiu dièsel-elèctric, que no està unit mecànicament en un mateix eix ni per engranatges, està pensat per vaixells amb demandes de potència inferiors i amb rutes de navegació més curtes i variades. Són un clar exemple els vaixells que realitzen gran quantitat de rutes en poc temps com poden ser ferris, embarcacions d'esbarjo, iots i petits creuers.

Això és degut a que els motors elèctrics presenten rendiments molt més elevats que els motors dièsel per a velocitats variables. Gràcies als convertidors de freqüència es poden variar les velocitats, fins a les més baixes, dels motors elèctrics mantenint el parell nominal i amb un rendiment quasi constant.

També és degut a que, en el sistema COEOD on s'utilitza el "Shaft Generator" per a l'entrada i sortida de port i es pretén el consum zero de combustible durant aquests règims de navegació, és necessari apagar i encendre el motor dièsel cada cop que es finalitza o es comença una ruta, cosa que no és òptim si aquest procediment s'ha de repetir sovint.

També cal destacar que, en quant a consum de combustible, els generadors sempre treballen en el seu punt òptim mantenint les revolucions de treball constants mentre que, els motors dièsel, quan han de canviar de velocitat, surten del seu punt òptim i el rendiment disminueix.



Il·lustració 25: Corba característica del consum de combustible d'un motor dièsel Font: fao.org

A afectes propulsius, en aquests tipus de sistema, es poden instal·lar hèlixs de pas fixa on el rendiment és superior que les de pas variable ja que mantenint el pas i reduint les revolucions es disminueix el consum de potència, mentre que, de l'altre manera, el consum és el mateix i el rendiment baixa. A més a més, en quant a manteniment i construcció, les hèlixs de pas fixa presenten un cost més baix respecte les de pas variable.

4.2 Conclusiones sobre el tipus de sistema a utilitzar

Un cop comparats els dos sistemes dièsel-elèctrics i estudiades les demandes propulsives i de navegació, així com el tipus de rutes que realitzarà el vaixell en qüestió, és decideix optar pel sistema propulsiu dièsel-elèctric compost per motors elèctrics i generadors dièsel separats.

L'ús d'aquest sistema suposa l'estudi sobre l'elecció dels motors elèctrics, generadors dièsel i tots els components que componen el sistema com són els convertidors de freqüència per regular la velocitat, els transformadors i convertidors AC-DC / DC-AC per regular el corrent elèctric i les bateries per emmagatzemar l'energia.

Aquest sistema permet la lliure distribució de tots aquests elements excepte dels motors elèctrics que han de situar-se, com és lògic, en el mateix eix dels propulsors.

4.3 Tipus de xarxa elèctrica

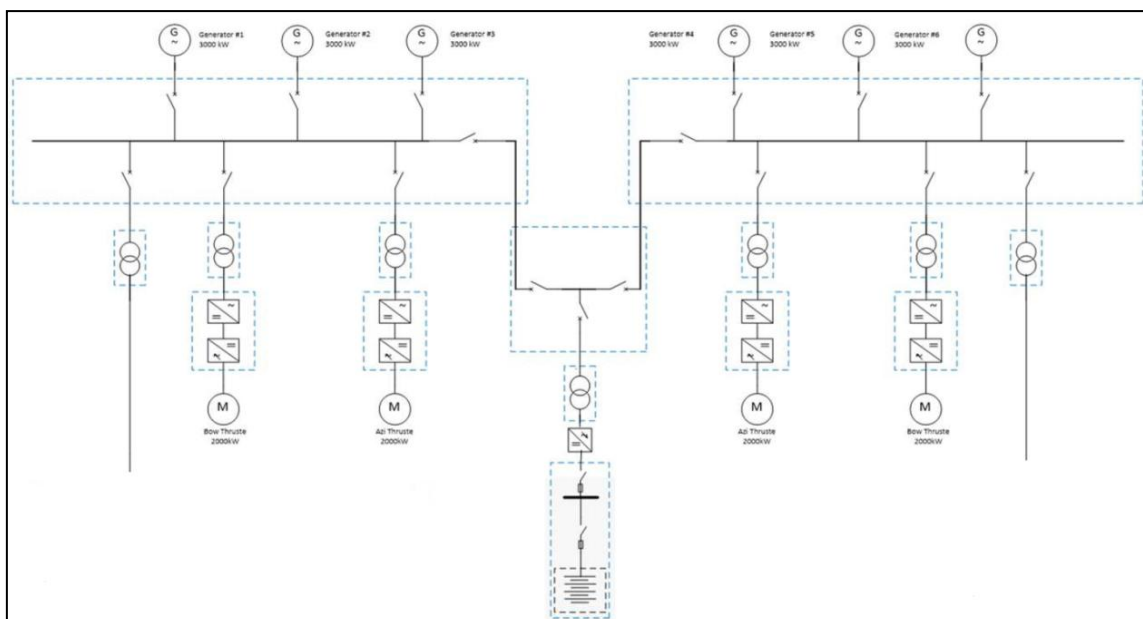
Aquest tipus de sistema dièsel-elèctric pot estar controlat per un quadre de distribució principal que treballa amb corrent alterna (AC System) o amb corrent continua (DC System). És per això que s'ha d'escollir quin tipus de corrent s'utilitza pel vaixell en qüestió tenint en compte els avantatges i els inconvenients.

4.3.1 Corrent alterna

La planta amb corrent alterna és la més comunament utilitzada des de que es va implementar aquest tipus de sistema propulsiu ja que és la manera més fàcil i barata de controlar l'energia. Normalment es basa en el control del corrent elèctric transformant el voltatge des dels generadors fins als motors elèctrics i fins la resta de consumidors de a bord ja que, per a grans potències, els motors i generadors treballen a alta tensió.

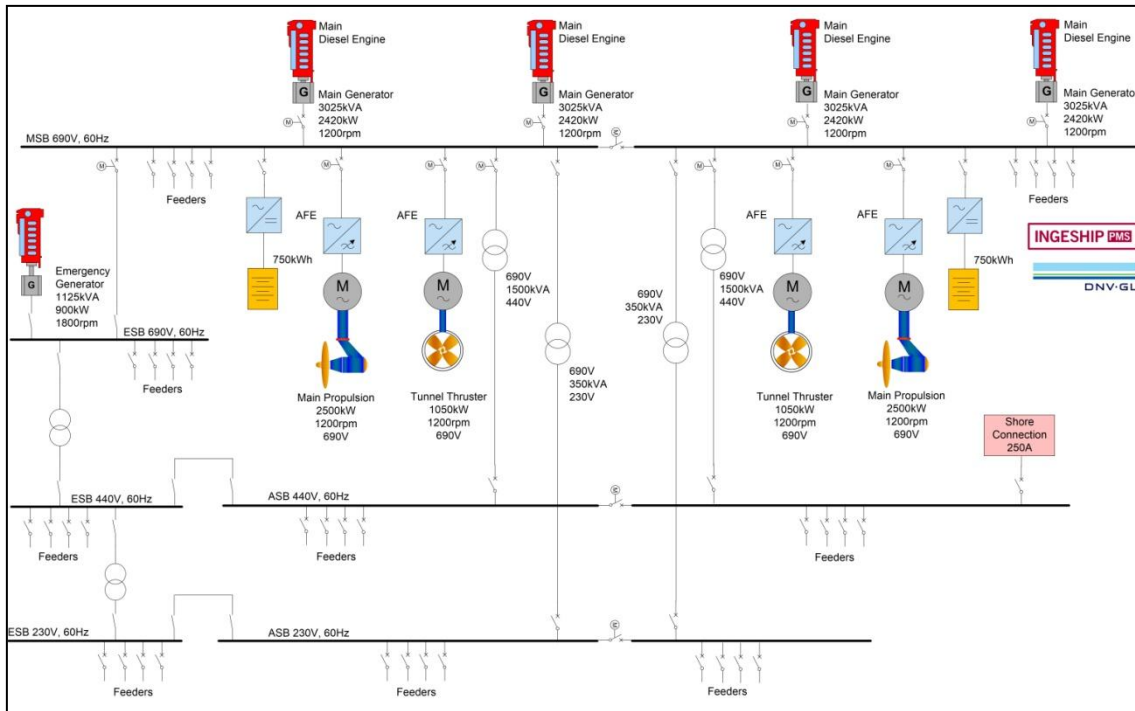
En aquests sistemes, els motors, estan controlats per convertidors de freqüència on el corrent ha estat prèviament transformat per un transformador. Aquests transformadors són el principal problema d'aquest tipus de sistema ja que les seves dimensions, el seu preu i el seu pes són elevats.

A més a més, en el cas d'incloure bateries, aquestes, han d'estar situades justament després d'un transformador i rectificador que permeti la correcta càrrega i descàrrega de l'energia elèctrica, cosa que augmenta les pèrdues de corrent.



Il·lustració 26: Esquema d'un sistema propulsiu controlat amb corrent alterna i motors a alta tensió Font: ABB

Recentment, empreses com Ingeteam en la que s'ha pogut contactar pel desenvolupament d'aquest treball, han dissenyat nous sistemes que consisteixen en tenir tots els elements de la planta en la mateixa tensió per tal d'eliminar els transformadors i reduir el cost, volum i pes del conjunt de la maquinària. Aquesta novetat, per això, només és útil per a vaixells que tinguin demandes de potència petites on els motors elèctrics i els generadors puguin treballar a baixa tensió.



Il·lustració 27: Esquema d'un sistema propulsiu controlat amb corrent alterna a baixa tensió Font: Ingeteam

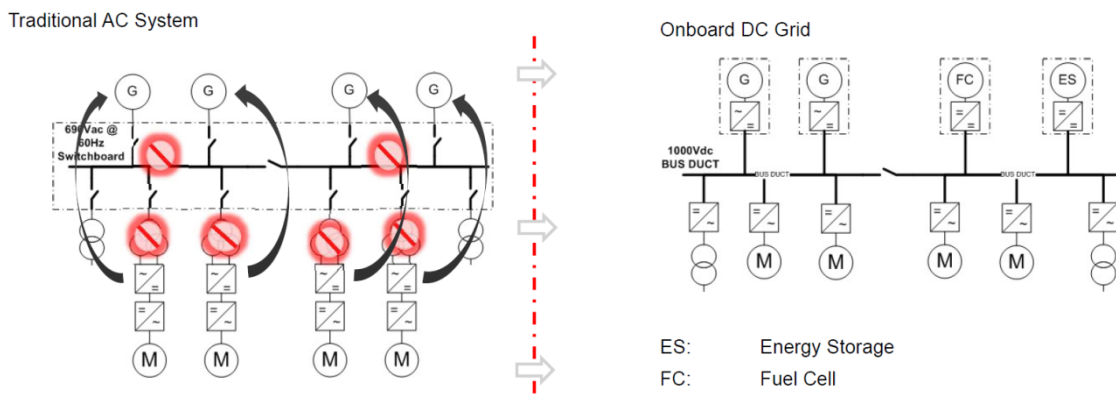
4.3.2 Corrent continua

Molt recentment s'estan implementant sistemes propulsius dièsel-elèctrics controlats per una planta de corrent continu normalment a 1000 V. Aquest tipus de planta, segons empreses del sector com ABB, que també s'ha pogut contactar, i Ingeteam, proporciona un augment de l'eficiència del 20% respecte la corrent alterna en termes de consum en vaixells amb petites i mitjanes demandes de potència i que realitzen rutes curtes.

Aquest tipus de sistema es basa en la rectificació del corrent procedent dels generadors per ser controlat pel quadre de distribució principal en corrent continu i seguidament dirigit cap als motors elèctrics on s'haurà d'invertir a corrent altern de nou.

La distribució amb corrent continu permet un gran control i una gran eficiència dels motors i les bateries on es generen menys pèrdues. A més a més cal destacar que, a diferència del sistema amb corrent altern amb elements a alta tensió, l'eliminació dels transformadors genera una disminució del pes i del volum del total de la maquinària propulsiva.

El principal inconvenient d'aquest sistema és l'elevat cost que té la maquinària degut a l'ús de l'alt voltatge en corrent continu que necessita una xarxa de cables i proteccions de seguretat considerada. També cal destacar que, actualment i tal i com s'ha mencionat anteriorment, aquest tipus de sistema, només genera més eficiència en vaixells que tenen petites i mitjanes demandes de potència i que realitzen rutes curtes on necessiten un gran control de l'embarcació.



Il·lustració 28: Comparació dels sistemes en corrent alterna i corrent continua Font: ABB

Actualment, aquest tipus de sistema, segons Ingeteam, només és recomanable per a vaixells que necessiten un control molt elevat dels motors com poden ser els que realitzen operacions a alta mar i han d'estar immòbils durant un cert temps.

4.4 Conclusions sobre el tipus de xarxa elèctrica a utilitzar

Després de conèixer les diferents avantatges i inconvenients de cada tipus de xarxa elèctrica, per el vaixell en qüestió, es decideix implementar una xarxa amb corrent alterna a baixa tensió. És el més adient en termes de relació consum/cost gràcies a que les baixes demandes de potència permeten l'ús de motors i generadors a baixa tensió i la prescindibilitat de grans transformadors.

El voltatge de la planta serà de 690 V recomanat per Ingeteam perquè és el màxim dins del rang de baixa tensió i, també, perquè els motors i generadors amb potències al voltant dels 2500 kW són a 690V com a mínim. La freqüència serà de 50 Hz ja que realitzarà rutes per Europa on les connexions a port son a aquesta freqüència i a 380 V normalment.

Aquest tipus de planta no suposa tanta eficiència com la de corrent continu tot i que també és molt elevada ja que no es necessiten transformadors per al sistema propulsiu. En canvi, sí que disminueix molt el cost de la maquinària i augmenta la seguretat ja que es treballarà en corrent alterna de baixa tensió.

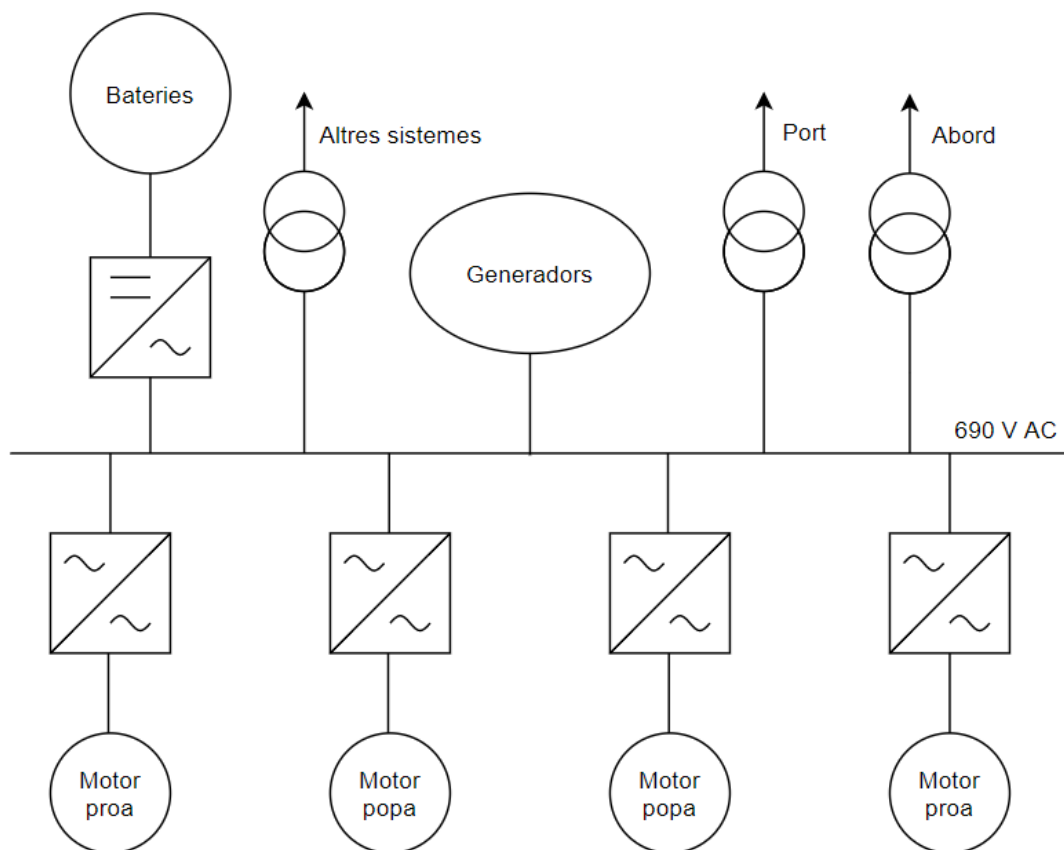
A més a més, aquest tipus de sistema elèctric sense transformadors i a baixa tensió proporciona simplicitat a l'hora de la instal·lació del cablejat i dona estabilitat ja que gràcies a les bateries es poden compensar els pics de consum.

També, en quan les hèlix han de frenar, s'estalvia energia ja que aquest sistema permet el pas bidireccional de l'energia elèctrica i retorna el corrent que no s'ha utilitzat o que s'està generant gràcies a la inèrcia dels propulsors en quan se'ls hi talla el subministrament elèctric.

4.5 Esquema primari unifilar del sistema

Per tal de fer una aproximació de com serà el sistema propulsiu i poder procedir al dimensionament de la maquinaria, es dibuixarà un esquema primari unifilar de tots els elements que el componen. Els elements són els següents:

- 2 motors elèctrics pels propulsors de proa
- 2 motors elèctrics de popa
- Transformadors de baixa tensió
- Convertidors de freqüència pels motors
- Grup de bateries
- Convertidor DC/DC pel grup de bateries



Il·lustració 29: Esquema primari unifilar del sistema Font: Propia

4.6 Consideracions de la normativa

Un cop esquematitzada com serà la unitat propulsiva del vaixell, cal saber com han d'estar i quants han de ser els components del sistema segons la normativa de la societat de classificació mencionada anteriorment. S'ha de saber com es dissenyarà exactament el sistema propulsiu i de generació de potència (establerts com a funcions principals d'un vaixell) estudiant quines són les redundàncies i disposicions de cada component del sistema.

4.6.1 Motors elèctrics

Primerament, tot el que són motors propulsius i motors de maniobra estan exclosos dels punts referents a la redundància dels components actius. És per això que ni els motors propulsius de popa ni els de maniobra de proa es duplicaran per si es produïssin fallades.

Seguidament, pel que fa als motors propulsius de popa, s'estableix que, aquests, han de poder subministrar el 70% de les seves revolucions nominals de servei sense cap problema i, també, tenir un cert marge de par per tal de poder seguir navegant a la velocitat nominal en condicions de mal temps.

4.6.2 Convertidors de freqüència

Pel que fa als convertidors de freqüència dels motors s'estableix que, al ser components actius que realitzen funcions principals, han d'estar duplicats per si en fallés algun però, segons un altre punt de la normativa, si la funció principal es pot seguir realitzant amb almenys el 40% de la capacitat en el cas de fallada d'un dels components, no és necessari aplicar els criteris de redundància. És per això que no es duplicaran els convertidors de freqüència ja que, en el cas de que en falli un, es pot seguir duen a terme la funció de propulsió o de maniobra al 50% ja que es disposa de dos propulsors de popa i dos de proa.

Està descrit en la normativa que els vaixells amb 2 o més motors propulsors amb convertidors de freqüència han de poder ser desconnectats en cas de fallada sense que afectin a altres components i que les operacions de propulsió i maniobra, encara que es redueixin, puguin seguir sent realitzades amb seguretat.

També es descriu que entre els motors i convertidors han d'haver desconnectadors manuals. Per tant s'establiran connectors en cada component i desconnectadors manuals entre els motors i convertidors.

4.6.3 Generadors principals i d'emergència

El sistema generador de potència ha de comptar amb suficient redundància per si algun dels components falla i es pugui seguir subministrant energia. Han de tenir suficient redundància els generadors i els transformadors perquè en el cas de que qualsevol d'aquests falli es pugui seguir subministrant energia a tots els serveis. És per això que es dimensionaran suficients generadors i transformadors per prevenir qualsevol fallada d'algun d'aquests.

A més, almenys dos fonts de potència (generadors) s'han de connectar en diferents embarrats elèctrics dins del sistema. Els transformadors duplicats també s'han de posar en diferents embarrats.

En el cas de fallada complerta del sistema principal de generació de potència, ha d'haver un sistema d'emergència que ha de poder subministrar suficient potència a aquells serveis essencials mencionats per la normativa durant un període de 36 hores.

Aquest sistema d'emergència ha de tenir el seu propi sistema de combustible independent i està exclòs de la normativa de redundància. Ha de poder estar disponible en qualsevol moment i poder restablir el sistema propulsiu, en cas de caiguda total de la planta principal, en menys de 30 minuts.

És per això que s'establirà un grup de generadors principals capaços de subministrar suficient potència per a tot el vaixell i un generador d'emergència per complementar-los en el cas de que qualsevol d'aquests falli i, així, es pugui seguir subministrant electricitat a tots els serveis. Aquest generador d'emergència serà capaç de subministrar potència a tots els serveis essencials del vaixell durant 36 hores en cas de caiguda de la planta generadora principal.

4.6.4 Quadres de distribució

El quadre principal de distribució estarà dividit en dos seccions tal i com diu la normativa perquè cada grup de consumidors i sistema essencial estigui connectat en cada una d'aquestes. Els generadors estaran separatament connectats de manera equilibrada en cada una de les seccions. Aquestes dos seccions han d'estar connectades per un connector de manera que es pugui desconnectar quan sigui necessari i en cas de fallada perquè l'altre secció pugui seguir sent utilitzada amb normalitat.

El quadre principal ha de subministrar el quadre d'emergència i tenir un connectador automàtic que els desconnecti en cas de fallada del sistema principal.

Pel que fa a la lluminària, la principal estarà connectada al quadre de distribució principal i la d'emergència al quadre d'emergència.

En quant a la connexió a port, es connectarà directament al quadre de distribució principal amb un interruptor tal i com obliga la normativa.

4.6.5 Bateries

Es separaran el conjunt de les bateries en 2 grups com a mínim i es dimensionaran segons la potència i capacitat necessària (durant la navegació a port) ja que així ho diu la normativa. Cada grup estarà connectat a una secció del quadre principal per un connectador automàtic i un de manual de seguretat.

El grup de bateries per la propulsió a port s'utilitzarà com a font elèctrica de transició en cas d'emergència ja que la normativa així ho permet. Tindran suficient capacitat per subministrar energia als elements essencials i es podran carregar amb el generador d'emergència.

4.6.6 Transformadors

Els transformadors, al tractar-se d'elements actius de transmissió de potència han de complir amb la normativa de redundància i hauran d'estar duplicats i connectats cada un a un embarrat diferent del quadre de distribució principal.

També s'hauran d'instal·lar d'altres per connectar el quadre d'emergència amb els embarrats d'altres tensions més baixes.

4.7 Selecció dels motors propulsius

A partir dels càlculs de les necessitats propulsives de l'embarcació desenvolupats anteriorment, es durà a terme l'elecció dels motors elèctrics tenint en compte la potència i el par mínim que han de subministrar per a la velocitat de servei (potència de 4751 kW repartida entre els 2 motors i Par de 138,5 kNm per cada un d'aquests).

Es pretén seleccionar els motors que tinguin la potència mecànica nominal menor i que compleixin amb les demandes citades per tal de reduir al mínim el consum d'electricitat i, en conseqüència, el de combustible.

Per l'elecció dels motors és necessari disposar de catàlegs sobre màquines elèctriques d'algun dels fabricants del sector. És per això, que s'ha estat buscant i consultant en diferents empreses com ABB, VEM Group, Wärtsilä, MAN i Ingeteam on, d'aquesta última, s'ha pogut obtenir informació tècnica sobre motors de 2500 kW i 690V (baixa tensió) anomenats INDAR ACP-500-S/6.

Són motors d'inducció (asíncrons) de tipus "jaula de ardilla" ja que són els més adient pel tipus de vaixell en qüestió perquè les potències, en referència al sector naval, són baixes i, a més, aquest tipus de màquina té un cost menor i és més fàcil de mantenir.



Il·lustració 30: Motor 2500 kW INDAR

Les característiques principals del motor INDAR ACP-500-S/6 són:

- Motor asíncron trifàsic de tipus “jaula de ardilla”
- 690 V de voltatge nominal
- 60,65 Hz de freqüència nominal
- 6 pols
- Circuit refrigerant amb aigua i aire amb un consum de 86 W
- Velocitat de sincronisme de 1213 rpm
- Velocitat del rotor de 1200 rpm en el punt nominal
- Corrent de 2474 A en el punt nominal
- Par de 19,894 kNm en el punt nominal
- Par màxim de 35,61 kNm en 1178 rpm
- Par d'arrencada de 10,94 kNm amb corrent de 9912 A
- Eficiència al 100% de 95,96%
- Eficiència al 75% de 96,41%
- Eficiència al 50% de 96,37%
- Factor de potència de 0.88

Pel que fa a la freqüència de 60,65 Hz no suposa cap inconvenient ja que s'utilitzaran convertidors de freqüència que variaran els 50 Hz de la planta elèctrica a les diferents freqüències que necessitin els motors.

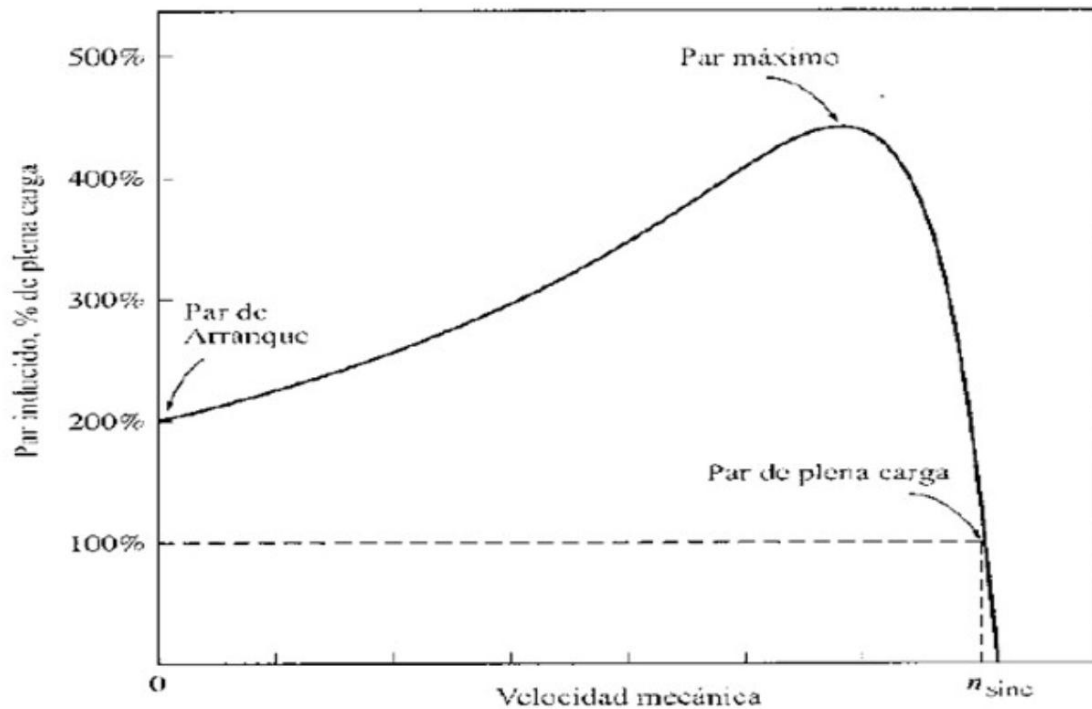
Per altre banda s'observa que el par nominal que genera el motor (19,894 kNm) és inferior al par que necessiten els propulsors (138,5 kNm) mentre que, les revolucions d'aquest (1200 rpm), són majors a les que necessiten les hèlixs (163,8 rpm).

És per això que s'optarà per estudiar si es possible l'ús d'una reductora per tal de reduir les revolucions procedents del motor i augmentar el par mecànic d'aquest i poder utilitzar el motor de 2500 kW i no haver de seleccionar un de superior, cosa que significaria un augment del consum elèctric. Cal destacar que les reductores per aquest tipus de pars i revolucions tenen uns rendiments aproximats de 97%.

A continuació es calcularà la corba par-velocitat del motor per comparar-la amb la corba de les hèlix ja calculada anteriorment i observar la diferència que s'ha de disminuir amb l'ús d'una reductora.

4.7.1 Càlcul de la corba par-velocitat del motor seleccionat

Amb les dades mencionades pel fabricant no es pot obtenir una corba par-velocitat exacta però si aproximada a partir dels tres punts més importants que són, el par d'arrencada, el par màxim i el par nominal o de plena carga i sabent com són les corbes típiques dels motors asíncrons tipus "jaula de ardilla".



Gràfica 4: Corba par-velocitat típica d'un motor asíncron de "jaula de ardilla" Font: Universidad Nacional de Perú

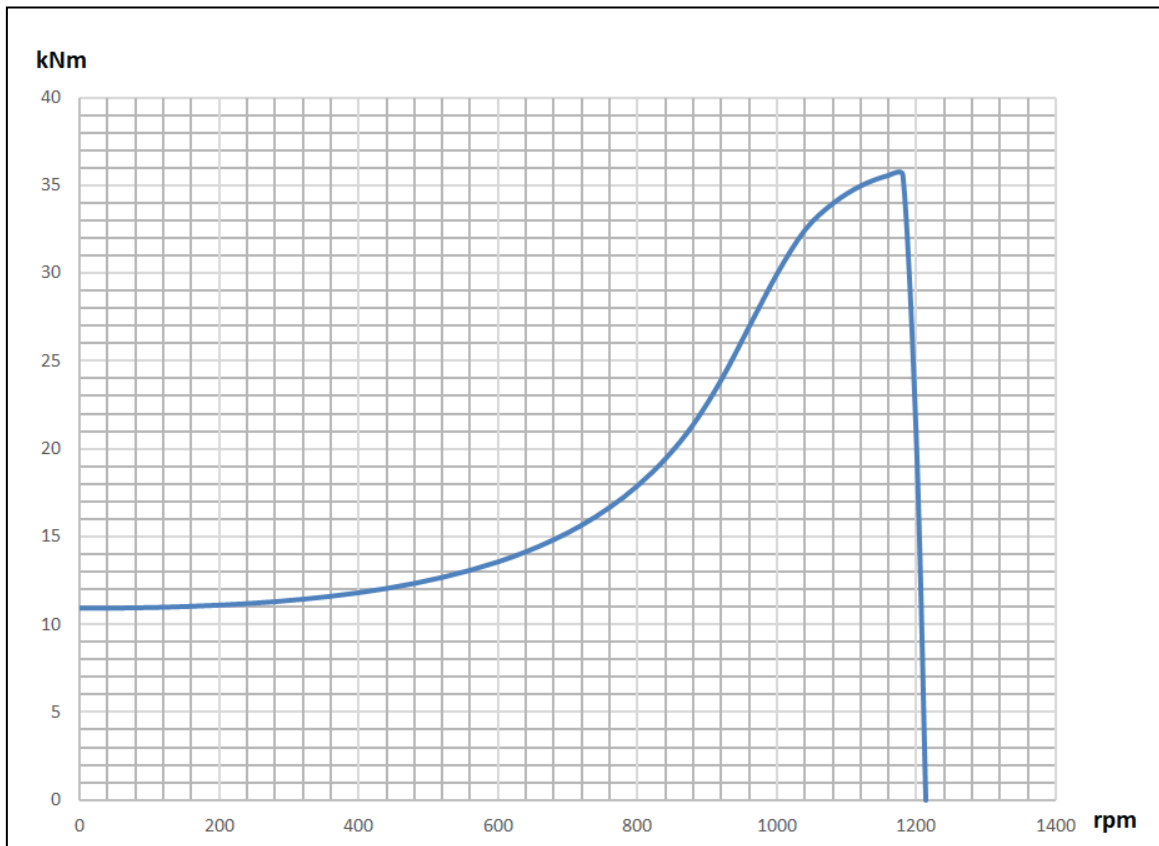
A partir de la següent fórmula que relaciona els pars amb els lliscaments del rotor es pot obtenir la primera part de la corba que va des de el par d'arrencada fins al par màxim.

$$\frac{T_{arr}}{T} = \frac{2}{\frac{s_{arr}}{s} + \frac{s}{s_{arr}}}$$

On:

- T_{arr} : Par d'arrencada ($T_{arr}=10,894$)
- T : Par a calcular per a cada velocitat
- s_{arr} : lliscament d'arrencada ($s_{arr}=1$)
- s : lliscament per a cada velocitat

Seguidament per calcular l'altre part de la corba que va des de el punt de par màxim fins al punt de par nominal, s'ha estimat amb una recta entre aquests ja que amb les dades mostrades pel fabricant no es pot calcular una corba exacte.



Gràfica 5: Corba Par-rpm aproximada de cada motor INDAR ACP-500-S/6 Font: Propia

4.8 Càlcul de la reductora

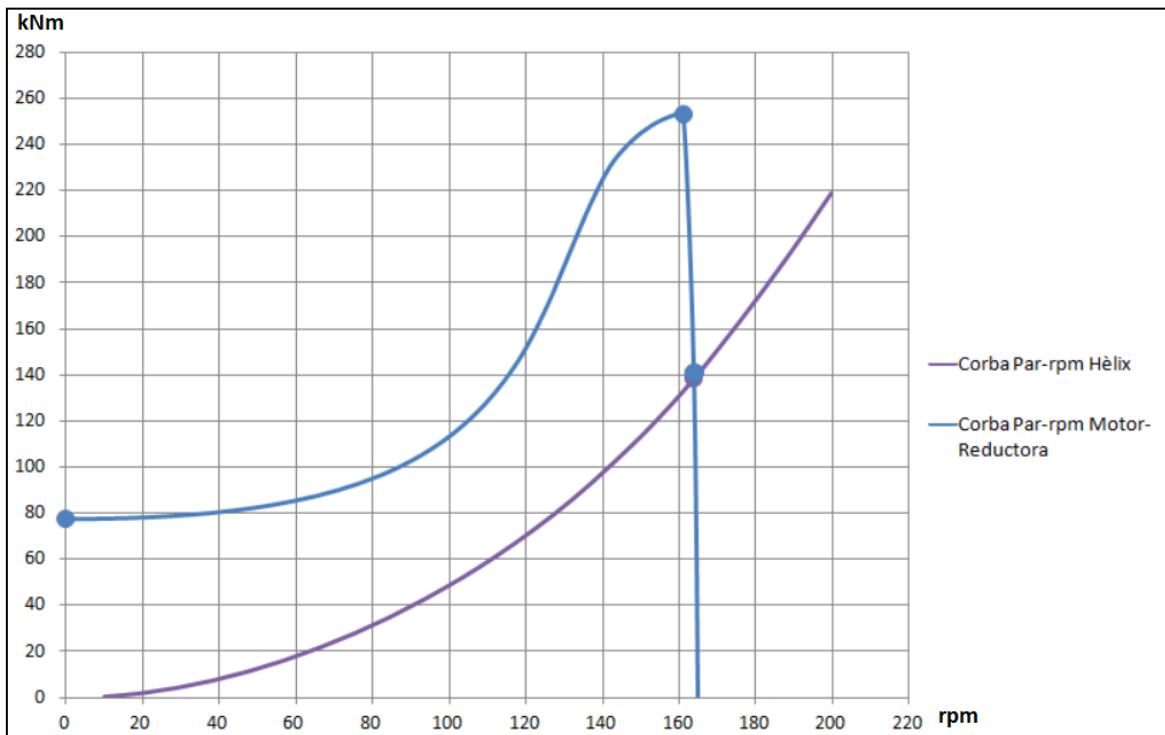
Per tal de poder fer coincidir el punt de navegació amb el punt de funcionament nominal del motor, serà necessari l'estudi d'una reductora que disminueixi les revolucions i augmenti el par ja que l'equació d'una reductora ve determinada per:

$$Par1 \times rpm1 = Par2 \times rpm2 \times \eta$$

Primerament es calcularà la relació de revolucions necessària dividint les del rotor del motor asíncron de 1200 rpm i les necessitats per cada hèlix de 163,8 rpm. La relació obtinguda és de 7,32.

Seguidament es multiplicarà aquesta relació de 7,32 pel par nominal del motor asíncron de 19,894 kNm i pel coeficient de rendiment de 0,97. El resultat obtingut és de 141,3 kNm i significa que, utilitzant la reductora, s'obté un par lleugerament superior al demandat per les hèlixs de 138,5 kNm. Això significa que l'ús d'una reductora amb una relació de 7,32 és plenament factible per utilitzar els motors INDAR ACP-500-S/6 de 2500 kW.

Per finalitzar amb els càlculs del motor i la reductora, s'estimarà la corba de par-velocitat del motor asíncron juntament amb la reductora i es compararà amb la mateixa corba dels propulsors calculada anteriorment.



Il·lustració 31: Corbes Par-rpm del motor amb reductora i l'hèlix Font: Propia

S'observa que el punt de navegació de la corba de l'hèlix amb el punt de funcionament nominal del motor estan fusionats, cosa que significa que el motor treballarà en les condicions òptimes generant les revolucions i el parell desitjat per a la velocitat de disseny del vaixell.

4.9 Selecció dels motors de proa

A l'igual que pels motors de popa, sabent les demandes de potència mecànica que requereixen els propulsors de proa (500 kW cada un), s'ha buscat i consultat a les diferents empreses del sector on, de VEM Group, s'ha pogut obtenir informació tècnica, en els catàlegs online, sobre motors de 550 kW i 690V (baixa tensió) anomenats VEM motors IE2-WE2R 355 L4 NS LL HW.



Il·lustració 32: Motor 550 kW VEM Group Font: VEM Group

Les característiques principals del motor VEM Motors IE2-WE2R 355 L4 NS LL HW són:

- Motor trifàsic asíncron de tipus “jaula de ardilla”
- 690 V de voltatge nominal
- 60 Hz de freqüència nominal
- 4 pols
- Circuit refrigerant amb aigua i aire
- Velocitat de sincronisme de 1800 rpm
- Velocitat del rotor de 1794 rpm en el punt nominal
- Corrent de 560 A en el punt nominal
- Par de 2,795 kNm en el punt nominal
- Par màxim de 9,227
- Par d'arrencada de 3,635 kNm amb corrent de 5040 A
- Eficiència al 100% de 95,8%
- Eficiència al 75% de 95,8%
- Eficiència al 50% de 95,5%
- Factor de potència de 0.83

4.10 Selecció dels convertidors de freqüència pels motors

4.10.1 Motors principals

Per tal de poder variar la velocitat dels motors s'utilitzaran uns convertidors de freqüència que permetran variar els 60,65 Hz i els 690 V nominals d'aquests podent mantenir un parell nominal suficient i, així, garantint la rotació mecànica de les hèlixs. S'instal·larà un convertidor per a cada motor. Aquests tipus de convertidors per a la variació de velocitat dels motors elèctrics s'anomenen DRIVES dins del sector marítim. Consten d'un rectificador i d'un inversor que varien la freqüència i permeten el pas bidireccional de l'energia elèctrica pel cas en el que els propulsors estan frenant i generant electricitat (només en motors síncrons).

A l'igual que pels motors, s'ha buscat a l'empresa Ingeteam on hi ha una àmplia gama de convertidors de freqüència (DRIVES) que va des dels 380 V als 7 kV de voltatge i des dels 335 kW fins als 40 MW de potència.

Dins d'aquestes games s'ha preseleccionat la INGEDRIVE LV400 dissenyada per baixa tensió de 690 V i amb potència màxima d'entrada i sortida de 5765 kW. A partir d'aquí, al igual que pels motors, s'ha contactat amb l'empresa mostrant les demandes tècniques dels motors i s'han obtingut les dades tècniques sobre el model INGEDRIVE LV400 adequat. És necessari que els DRIVES s'adeqüin a les demandes dels motors per tal d'optimitzar el rendiment i els costos dels productes.

El model en qüestió és el INGEDRIVE LV4F-32-851WA capaç de subministrar una potència de sortida de 2880 kW i que pot ser alimentat per una xarxa de 690 V a 50 o 60 Hz. Aquest model consta d'un sistema de control remot des del pont de comandament on també es permet la configuració i la monitorització.

És important tenir una potència superior a la dels motors ja que, aquests, són capaços de sobrecarregar-se momentàniament i oferir més potència que la nominal durant petits períodes de temps.



Il·lustració 33: Convertidor de freqüència INGEDRIVE LV4F

Les característiques principals d'aquest convertidor són:

- Freqüència de sortida d'entre 0 i 120 Hz
- Voltatge de sortida d'entre 360 a 690 V
- Rendiment de 0,961
- Factor de potència de 1
- Corrent màxima d'entrada de 2670 A
- Corrent màxima de sortida de 2853 A
- Refrigerat per aigua dolça
- Temperatura ambiental d'entre 0 i 45 °C
- Humitat ambiental d'entre 5 i 95%
- Soroll generat de menys de 75 dB a 1 metre de distància
- Proteccions de sobrecarrega, sobrevelocitat, sobrecorrent, sobretensió, baixa tensió, fugues, detecció de curtcircuits, entre d'altres
- Sistema d'emergència amb parada automàtica en cas de fallada del sistema

4.10.2 Càlculs de les freqüències i intensitats per a cada velocitat

Un cop seleccionat el convertidor de freqüència es calcularan les diferents freqüències que es necessitaran per a cada velocitat del vaixell. Per dur a terme aquests càlculs s'utilitzaran les següents equacions fixant que el lliscament és el del punt de parell nominal del motor ($s=0,0107$):

$$ns = \frac{120 \times f}{n^{\circ}pols}$$

$$nr = ns \times (1 - s)$$

On:

- ns: Revolucions de sincronisme (1213 rpm per a 60,65 Hz)
- f: Freqüència del motor
- nr: Revolucions del rotor (1200 rpm per a 60,65 Hz)
- s: Lliscament del motor

Amb aquestes dues equacions sabent que el valor nr multiplicat pel coeficient de la reductora és les rpm en que han de girar les hèlixs, es calculen totes les freqüències per a cada velocitat.

A més a més, sabent la potència mecànica que han de desenvolupar els motors i aplicant els rendiments, s'obté la intensitat que s'ha de subministrar per a cada velocitat i motor amb les següents fórmules:

$$\eta_{motor i DRIVE} = \frac{P_{mec}}{P_{elec}} = \frac{Q_{mec} \times \omega_r}{\sqrt{3} \times V_n \times I_n \times f_p}$$

On:

- η motor i DRIVE: 0,9596 x 0,961
- P_{mec} : Potència mecànica necessària de cada hèlix
- Q_{mec} : Par mecànic necessari de cada hèlix
- ωr : Revolucions necessàries de cada hèlix en rad/s
- P_{elec} : Potència elèctrica necessària
- V_n : Voltatge nominal de la planta/motor/DRIVE
- I_n : Intensitat necessària
- f_p : Factor de potència del motor

Els resultats dels càlculs de les freqüències i intensitats necessàries per a cada velocitat i motor del vaixell que hauran de controlar els DRIVES són els següents:

V (kn)	nr hèlixs (rpm)	s	ns motor (rpm)	f (Hz)	I_n (A)
1	9,9	0,0107	73,3	3,7	0,6
2	19,5	0,0107	144,3	7,2	4,4
3	28,9	0,0107	213,8	10,7	13,8
4	38,2	0,0107	282,7	14,1	31,2
5	47,5	0,0107	351,5	17,6	59,0
6	56,7	0,0107	419,5	21,0	99,2
7	66	0,0107	488,4	24,4	154,9
8	75,2	0,0107	556,4	27,8	227,0
9	84,4	0,0107	624,5	31,2	318,8
10	93,6	0,0107	692,6	34,6	433,5
11	102,9	0,0107	761,4	38,1	574,1
12	112,3	0,0107	830,9	41,5	746,2
13	122	0,0107	902,7	45,1	959,9
14	131,9	0,0107	976,0	48,8	1220,9
15	142,1	0,0107	1051,4	52,6	1546,2
16	152,7	0,0107	1129,9	56,5	1943,1
17	163,8	0,0107	1212,0	60,6	2443,4
18	175,6	0,0107	1299,3	65,0	3084,6
19	187,7	0,0107	1388,8	69,4	3846,3
20	199,6	0,0107	1476,9	73,8	4706,9

Taula 11: Freqüència i intensitat per a cada velocitat

Aquests resultats són els teòrics en condicions normals de navegació però sabent que es pot subministrar fins a 2670 A es permet un petit marge per a condicions de navegació més complicades. També es sap que en condicions de desacceleració, on els motors no necessiten tant parell mecànic i per tant menor potència mecànica i elèctrica, les intensitats demandades seran inferiors ja que els DRIVES es regularan depenent de l'autorregulació dels motors. En condicions d'acceleració, en canvi, les demandes d'intensitat seran més elevades ja que els propulsors requeriran més par i, en conseqüència, més potència mecànica i elèctrica.

4.10.3 Motors de proa

A l'igual que els convertidors pels motors de popa, s'utilitzaran 2 per variar la velocitat dels 2 propulsors de proa. Aquests seran de la mateixa empresa que els seleccionats anteriorment, Ingeteam. Els anomenats DRIVES seran de la mateixa gama de INGEDRIVE LV400 ja que és la que treballa a 690 V i amb el rang de potències necessari.

A partir d'aquí, s'ha obtingut de l'empresa, un catàleg general de la gama LV400 per a baixes potències amb les característiques generals. Com s'ha dit anteriorment, és necessari que els DRIVES s'adeqüin correctament a les demandes dels motors per tal d'optimitzar el rendiment i els costos dels productes. És per això que, observada la potència i la intensitat màxima de cada convertidor, s'ha seleccionat el de 690 kW i 675 A de valors màxims ja que és el primer que compleix amb les demandes del motor.

Aquest model també consta d'un sistema de control remot des del pont de comandament on també es permet la configuració i la monitorització.

Les característiques principals d'aquest convertidor són:

- Freqüència de sortida d'entre 0 i 120 Hz
- Voltatge de sortida d'entre 360 a 690 V
- Rendiment de 0,96
- Factor de potència de 1
- Corrent màxima de 675 A
- Refrigerat per aire
- Temperatura ambiental d'entre 0 i 40 °C
- Humitat ambiental d'entre 5 i 95%
- Soroll generat de menys de 80 dB a 1 metre de distància
- Proteccions de sobrecarrega, sobrevelocitat, sobrecorrent, sobretensió, baixa tensió, fugues, detecció de curtcircuits, entre d'altres
- Sistema d'emergència amb parada automàtica en cas de fallada del sistema

En quant a la potència que demandaran els motors, s'assumirà que, durant les condicions de maniobra, es necessitarà el corrent nominal en tot moment ja que és molt complex un càlcul concret de la demanda propulsiva de les hèlix de proa durant les maniobres d'entrada i sortida de port.

4.11 Selecció dels generadors i bateries

Per a la selecció dels generadors i les bateries és necessari saber quina és la demanda d'energia del vaixell durant els diferents règims de navegació. És per això que s'obté el balanç elèctric del creuer en qüestió ignorant la part de serveis propulsius ja que s'ha d'actualitzar completament i sumar-ho a la resta.

El balanç ja calculat té en compte, segons s'explica, el coeficient d'utilització k_u que és producte dels coeficients de simultaneïtat de marxa k_n i de servei i règim k_{sr} .

Els diferents consumidors del vaixell són:

- Serveis sanitaris, sèptics i altres
- Màquines auxiliars de coberta
- Luminària
- Equips de navegació, comunicació i ràdio
- Ventilació
- Serveis d'habilitació, cuina, bugaderia i taller
- Aire condicionat i calefacció

Els consumidors propulsius són:

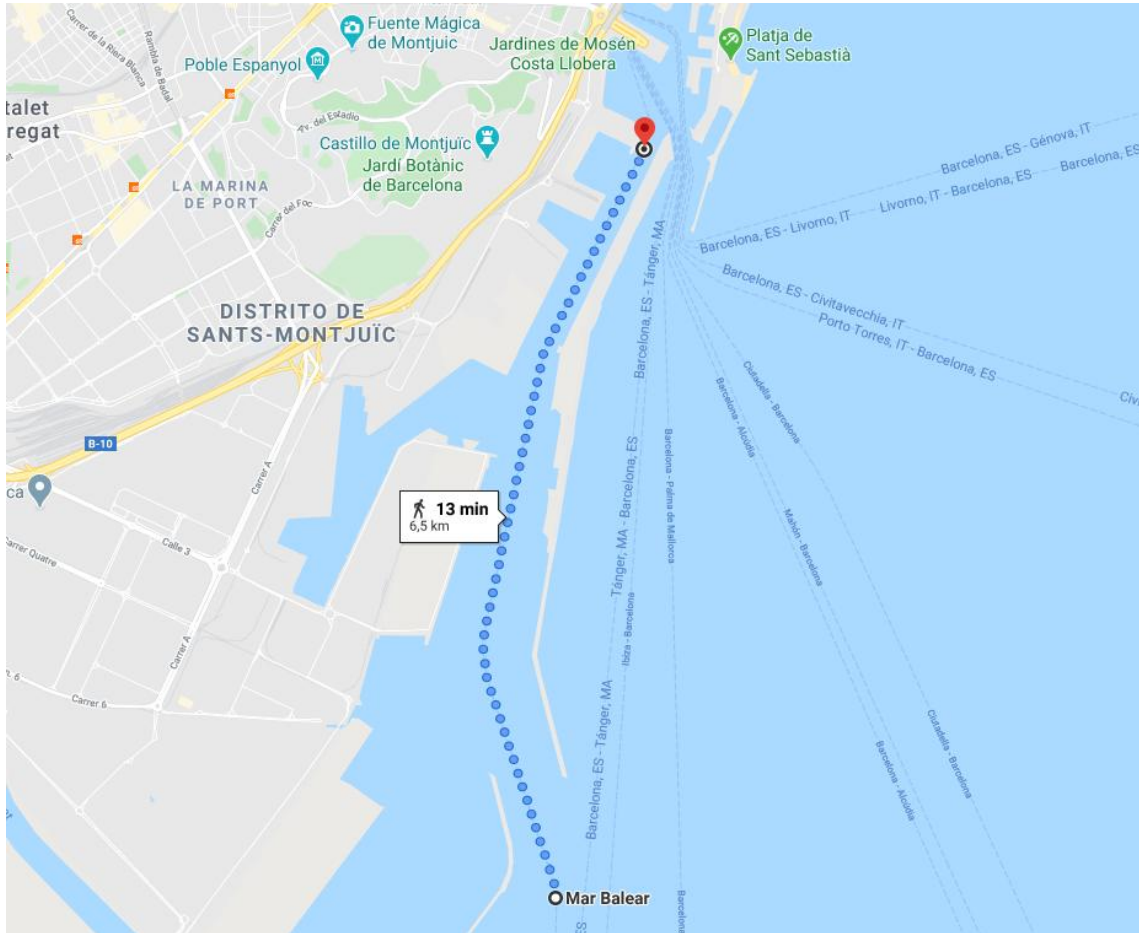
- Motors de popa
- Motors de proa
- Convertidors de freqüència

Es calcularan les potències propulsives a partir de la potència mecànica nominal multiplicant pels rendiments dels motors i dels convertidors de freqüència.

La potència propulsiva dels motors de popa durant el règim d'entrada i sortida de port es determinarà a partir de la demanda necessària a 7 nusos ja que és el màxim de velocitat que acostumen a permetre els ports. Per la condició de maniobra es calcularà la potència màxima que poden consumir els propulsors de proa juntament amb la demanda necessària a 4 nusos dels propulsors de popa ja que són necessaris per maniobres com la ciavoga.

Finalitzats els càlculs per a les 2 condicions es sumen i s'estableix una aproximació de la potència que han de tenir les bateries.

Pel càlcul de la capacitat necessària de les bateries s'estima el recorregut que ha d'efectuar per un port dels més grans com el de Barcelona a 7 nusos. D'aquesta manera es pot calcular el temps i la quantitat de potència que consumirà.



Il·lustració 34: Recorregut durant l'entrada i sortida del port de Barcelona Font: Propia

El recorregut s'estima des de fora de l'entrada del port fins al final de la terminal de creuers. Sabent que són uns 6,5 km (3,5 milles nàutiques) i que s'ha de navegar a 7 nusos, el temps aproximat és de 30 minuts. Un cop a dins, durant la maniobra d'atracar, s'estima una duració de 10 minuts. Finalitzats els càlculs per a les 2 condicions es sumen i s'estableix una aproximació del que ha de ser la capacitat de les bateries.

Un cop determinats els diferents grups consumidors i establerts els seus consums es calcularà la suma total del consum energètic per a les diferents situacions de navegació tant de dia com de nit.

4.11.1 Balanç elèctric

DIA	Grup consumidor	Navegació	Entrant/Sortint de port	Maniobrant	Port sense passatge	Port amb passatge
	Serveis de maquinaria propulsora de popa	5425,3	327,7	65,1	0,0	0,0
	Serveis sanitaris, sèptics i altres	114,4	114,4	112,0	67,2	85,9
	Propulsors de proa	0,0	0,0	1041,7	0,0	0,0
	Màquines auxiliars de coberta	203,1	203,1	424,0	162,7	262,7
	Lluminària	628,2	628,2	628,2	628,2	628,2
	Equips de navegació i ràdio	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7
	Ventilació	167,7	167,7	164,2	95,3	167,7
	Serveis d'habilitació, cuina, bugaderia i taller	424,6	424,6	432,0	176,0	489,3
	Aire condicionat/Calefacció	1210,8	1210,8	1210,8	691,9	1210,8
	TOTAL (kW)	8200,8	3103,2	4104,7	1848,0	2871,3
	Temps aproximat (minuts)		30,0	10,0		
	kWh necessaris		1551,6	684,1		
	SUMA kWh A PORT			2235,7		
NIT	Grup consumidor	Navegació	Entrant/Sortint de port	Maniobrant	Port sense passatge	Port amb passatge
	Serveis de maquinaria propulsora de popa	5425,3	327,7	65,1	0,0	0,0
	Serveis sanitaris, sèptics i altres	114,4	114,4	112,0	67,2	85,9
	Propulsors de proa	0,0	0,0	1041,7	0,0	0,0
	Màquines auxiliars de coberta	203,1	203,1	424,0	162,7	262,7
	Lluminària	2512,7	2512,7	2512,7	2512,7	2512,7
	Equips de navegació i ràdio	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7
	Ventilació	169,7	169,7	164,2	95,3	169,7
	Serveis d'habilitació, cuina, bugaderia i taller	424,6	424,6	432,0	176,5	489,3
	Aire condicionat/Calefacció	1210,8	1210,8	1210,8	691,9	1210,8
	TOTAL (kW)	10087,3	4989,7	5989,2	3733,0	4757,8
	Temps aproximat (minuts)		30,0	10,0		
	kWh necessaris		2494,8	998,2		
	SUMA kWh A PORT			3493,0		

Taula 12: Balanç elèctric

Consum de la potència reactiva dels motors:

- Motors de popa (x2): 2700 kVAr
- Motors de proa (x2): 738 kVAr

El consum de potència de tots els consumidors essencials en la situació d'emergència és de 820 kW juntament amb els serveis de maquinaria propulsora. És per això que, en cas de caiguda de la planta principal, el generador d'emergència hauria de subministrar suficient potència per mantenir la seguretat del vaixell.

Això significa que hauria de subministrar els 820 kW dels consumidors essencials i una potència per a la maquinaria propulsora suficient per navegar a una velocitat segura.

4.11.2 Generadors

És necessari fer una correcta selecció dels generadors perquè la demanda de potència durant la navegació tant de dia com de nit pugui ser subministrada perfectament. S'afegirà un generador d'emergència perquè, en el cas que fallés un o tots els generadors, es pugui seguir navegant amb seguretat. Tal i com diu la normativa, aquest generador ha de ser capaç de subministrar potència als consumidors essencials en cas de caiguda de la planta principal i seguir navegant a una velocitat segura.

Per a l'elecció dels generadors s'ha consultat a l'empresa Wärtsilä ja que disposa d'un catàleg online molt ampli de conjunts motor-alternador amb tensions d'entre 400 V i 13,8 kV amb totes les dades tècniques importants.

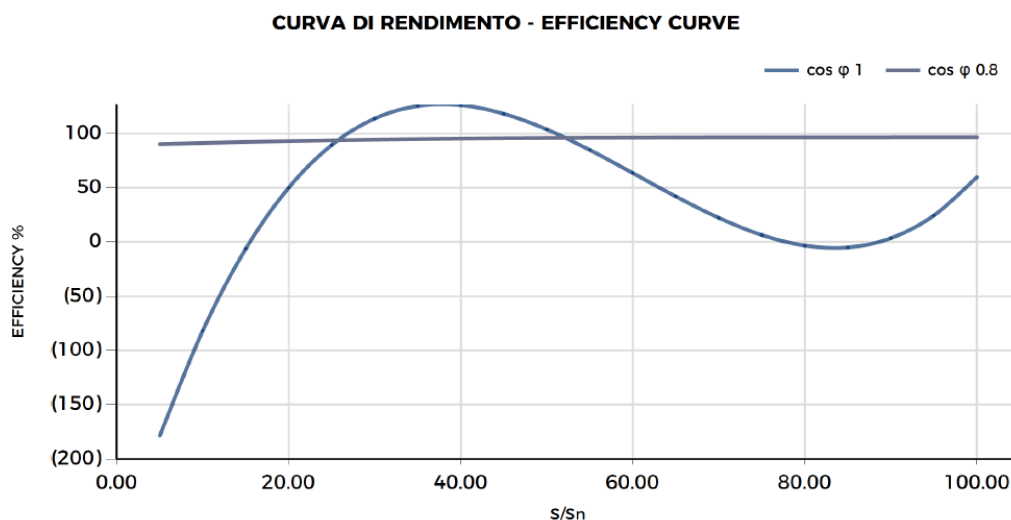
D'entre les games de generadors de que disposa l'empresa Wärtsilä, s'han estudiat totes les combinacions possibles per tal de donar eficiència i redundància tal i com diu la normativa. Finalment s'ha optat per obtenir aquests 5:

- 2 generadors Wärtsilä 32 Genset de 3340 kW amb 174 g/kWh de consum de fuel oil
- 2 generadors Wärtsilä 20 Genset de 1710 kW amb 190,3 g/kWh de consum de fuel oil
- 1 generador d'emergència Wärtsilä 20DF Genset de 1230 kW amb 8390 kJ/kWh de consum de dièsel o fuel oil

Amb la utilització dels dos generadors de 3340 kW i el de 1710 kW es subministra la potència necessària per la navegació de dia afegint el que falta per a la navegació de nit.

El generador d'emergència serà capaç de subministrar suficient potència pels consumidors essencials i per a la maquinaria propulsora per navegar a 7 kn.

El fet d'utilitzar generadors provoca que augmenti la flexibilitat del subministrament ja que, aquests, poden treballar entre el 50% i el 100% de la seva potència nominal i es mantenen entre 95% i 97% d'eficiència amb un factor de potència de 0,8.



Gràfica 6: Corba de rendiment d'un generador de 4000 KVA Font: MarelliMotori

Característiques generals dels generadors Wärtsilä 6L32 de 3340 kW:

- Potència nominal de 4175 KVA a 690 V i 50 Hz
- Potència reactiva de 2505 KVAR
- Factor de potència de 0.8
- 6 cilindres en línia
- 580 kW mecànics per cilindre (3480 kW en total)
- Eficiència del 96%
- Refrigerat per aigua
- Velocitat de 750 rpm
- Consum de fuel oil

Característiques generals dels generadors Wärtsilä 9L20 de 1710 kW:

- Potència nominal de 2137 KVA a 690 V i 50 Hz
- Potència reactiva de 1282 KVAR
- Factor de potència de 0.8
- 9 cilindres en línia
- 200 kW mecànics per cilindre (1800 kW en total)
- Eficiència del 96%
- Refrigerat per aigua
- Velocitat de 1000 rpm
- Consum de fuel oil

Característiques generals del generador Wärtsilä 8L20DF de 1230 kW:

- Potència nominal de 1537 KVA a 690 V i 50 Hz
- Potència reactiva de 922 KVAR
- Factor de potència de 0.8
- 8 cilindres en línia
- 160 kW mecànics per cilindre (1280 kW en total)
- Eficiència del 96%
- Refrigerat per aigua
- Velocitat de 1000 rpm
- Consum de fuel oil o dièsel



Il·lustració 35: Generador Wärtsilä Font: Wärtsilä

Generadors:

- Generador 1: 3340 kW i 2505 kVAr
- Generador 2: 1710 kW i 1282 kVAr
- Generador 3: 1710 kW i 1282 kVAr
- Generador 4: 3340 kW i 2505 kVAr
- Generador d'emergència: 1230 kW i 922 kVAr

Durant la navegació de dia (8200,8 kW):

Grup de generadors	Potència total (aplicant rendiment)
1+2+4 al 100%	8390 kW i 6293 kVAr
1+2+4 al 98%	8222 kW i 6167 kVAr

Durant la navegació de nit (10087,3 kW):

Grup de generadors	Potència total (aplicant rendiment)
1+2+3+4 al 100%	10100 kW i 7575 kVAr

4.11.3 Bateries

Per a l'elecció de les bateries cal saber quina és la necessitat energètica del vaixell durant els règims de navegació d'entrada i sortida del port i maniobrant. S'han de saber els kW de potència màxims que poden necessitar qualsevol d'aquests règims i els kWh que necessitaran depenent del temps.

Amb el balanç elèctric s'estima que el consum màxim seria durant la condició de maniobra nocturna amb una potència de casi 6000 kW. També durant la nit és quan es produiria la necessitat màxima de capacitat de les bateries de casi 3500 kWh.

Partint d'aquí i a l'igual que pels motors s'ha consultat, per a l'elecció de les bateries, a empreses del sector com VEM Group, Wärtsilä, MAN, Ingeteam i ABB on, d'aquesta última, s'ha pogut obtenir informació tècnica sobre diferents models.

Aquesta empresa disposa de mòduls de bateries pel sector naval amb l'inversor i el transformador bidireccional de corrent integrat. Les bateries en qüestió, anomenades CESM (Compact Energy Storage Modules) tenen una capacitat de 65 kWh cada una amb una potència de 100 kW.

Les característiques principals de les bateries són:

- Bateries de ió de liti
- 65 kWh de capacitat i 100 kW de potència
- Connectades trifàsicament i en paral·lel entre elles
- Voltatge en corrent alterna d'entre 208 i 690 V
- Freqüència d'entre 50 i 60 Hz
- Eficiència de 96%
- Vida de 4000 cicles (10 anys aproximats)
- 1100 kg i 1,08 m²
- Opció de control remot
- Protecció IP 21
- 23 °C ± 5 de temperatura ambient
- 60% d'humitat
- Màxim de 32 mòduls connectats en paral·lel
- Han d'estar ventilades i en llocs interiors
- Han d'estar instal·lades amb sistemes d'extinció d'incendis per CO₂
- Temps de carrega a màxima potència: 40 minuts



Il·lustració 36: Bateria CESM de ABB Font: ABB

Sabent la capacitat i la potència de les bateries es calcularà el número necessari de mòduls. El resultat més gran dels següents càlculs serà el número de mòduls necessaris:

$$\frac{6000 \text{ kW}}{100 \text{ kW}} = 60 \qquad \frac{3500 \text{ kWh}}{65 \text{ kWh}} = 54$$

Es necessitaran 60 mòduls de bateries que es dividiran en 2 grups ja que segons el fabricant no es poden connectar més de 32 en el mateix grup i segons la normativa han d'haver 2 grups com a mínim. Es connectaran en paral·lel entre ells per tal de sumar la potència i la capacitat.

En resum, s'obtindran 60 mòduls de bateries dividits en 2 grups i amb un total de 6000 kW i 3900 kWh.

En quant a la càrrega, a màxima potència es podrien carregar en 40 minuts però seria difícil subministrar 6000 kW. És per això que s'estima que durant l'estància a port amb durades d'unes 10 hores es necessitarien 390 kW per a la càrrega completa.

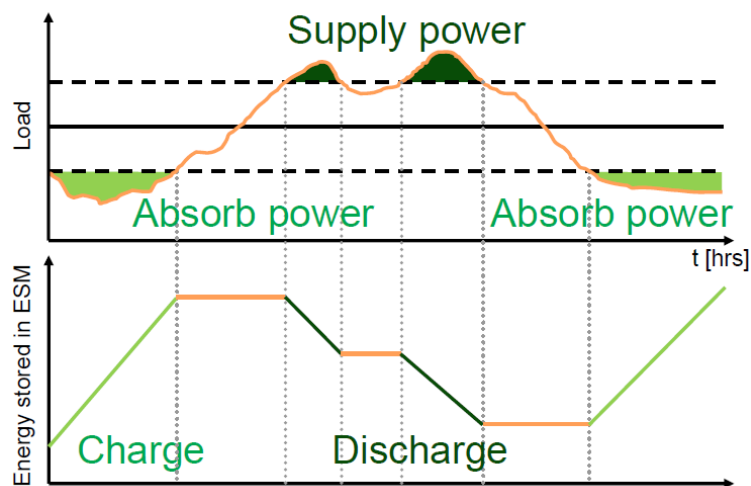
Durant la navegació es poden carregar durant les baixades de demanda energètica on les bateries es carreguen i permeten que els generadors segueixin treballant al seu règim nominal.

A part de subministrar l'energia necessària pels règims de navegació a port, també suposen altres beneficis molt importants durant la navegació a alta mar que ajuden a la reducció del consum de combustible.

Els beneficis són:

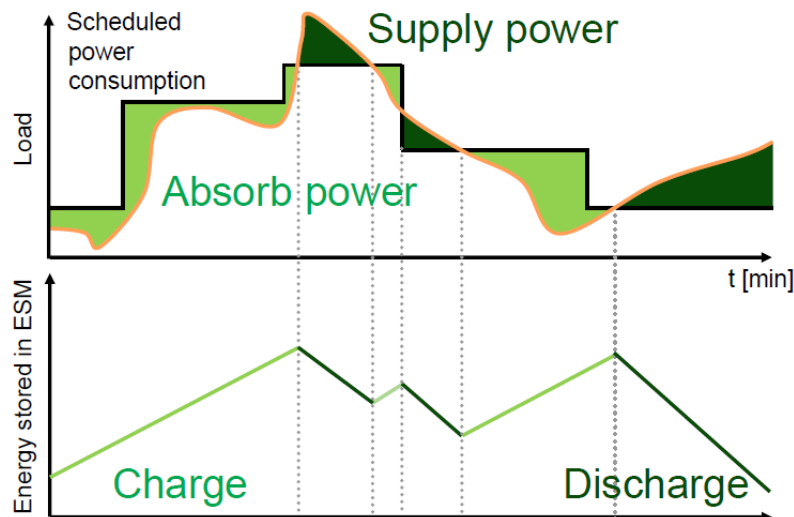
- Compensen la demanda d'energia de tots els consumidors del vaixell ajudant als generadors a mantenir-se a règim constant. Dins d'un rang de demanda, en quant aquesta baixa, les bateries es carreguen per oferir energia en quant aquesta mateixa puja.

Durant la navegació a alta mar en règims normals, les bateries van absorbint l'energia residual dels generadors en quan hi ha poca demanda i compensen les petites pujades momentànies que poden haver per tal de no canviar les revolucions d'aquests.



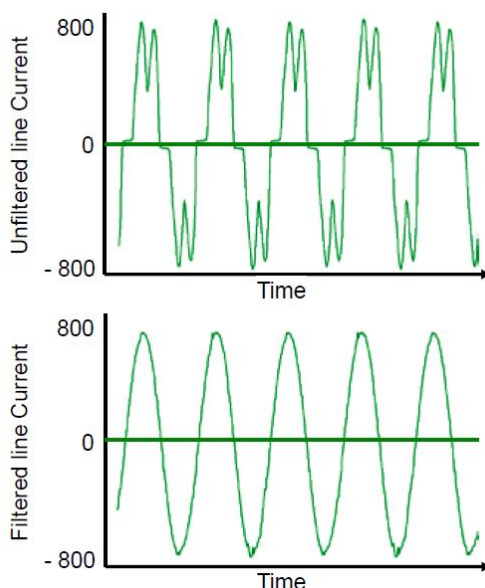
Gràfica 7: Compensació de la demanda energètica per les bateries Font: ABB

- Regulen els pics de potència i mantenen un subministrament constant cap als consumidors. D'aquesta manera permeten prescindir de condensadors a la instal·lació.



Gràfica 8: Regulació dels pics de potència per les bateries Font: ABB

- Regulen la qualitat de la potència subministrada actuant com a filtres mitgant els harmònics generats. Redueixen el THD (Distorsió total harmònica).



Gràfica 9: Reducció del THD per les bateries Font: ABB

4.12 Transformadors

La resta de consumidors de a bord del vaixell treballen a menys voltatge que el de la planta propulsora i és per això que és necessari l'ús de transformadors de baix voltatge.

A recepció de la lluminària que al consumir 2500 kW es connecta al embarrat de 690 V, els demes consumidors treballen a voltatges inferiors.

Els consumidors de fora de la planta propulsora utilitzen els següents voltatges:

- Serveis sanitaris, sèptics i altres: 380 V AC
- Màquines auxiliars de coberta: 380 V AC
- Luminària: 690 V AC
- Equips de navegació i ràdio: 230 V AC
- Ventilació: 380 V AC
- Serveis d'habilitació, cuina, bugaderia i taller: 230 V AC
- Aire condicionat i calefacció: 380 V AC
- Connexió a port: 380 V AC

Un cop es saben els voltatges també és necessari saber la màxima potència que poden consumir i, és per això que, s'utilitzarà el balanç elèctric de consum màxim on es determinen les màximes potències d'entre totes les situacions de navegació.

Balanç de les màximes potències en kW:

DIA	Grup consumidor	Màxim	NIT	Grup consumidor	Màxim
	Serveis sanitaris, sèptics i altres	114,4		Serveis sanitaris, sèptics i altres	114,4
	Màquines auxiliars de coberta	424,0		Màquines auxiliars de coberta	424,0
	Lluminària	628,2		Lluminària	2512,7
	Equips de navegació, ràdio i automoció	26,7		Equips de navegació, ràdio i automoció	26,7
	Calefacció i ventilació	167,7		Calefacció i ventilació	169,7
	Serveis d'habilitació, cuina, bugaderia i taller	489,3		Serveis d'habilitació, cuina, bugaderia i taller	489,3
	Aire condicionat	1210,8		Aire condicionat	1210,8

Taula 13: Balanç elèctric de les màximes potències de cada consumidor

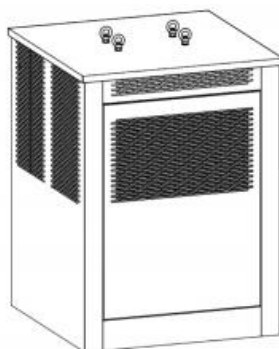
A partir d'aquests valors calculats es sumaran els consumidors que tinguin el mateix voltatge per tal de calcular el valor dels transformadors. S'instal·laran 2 transformadors per a cada transformació de voltatge separant les potències simètricament. En el cas de la connexió a port, es disposarà d'un transformador a part ja que la potència necessària és molt elevada perquè es contempla la possibilitat de que, depenent del port, el vaixell pugui estar connectat sense utilitzar generadors.

En resum, es necessitaran 6 transformadors que estaran duplicats per complir amb la normativa de la redundància i amb el següent voltatge i potència:

- 2 de 690V/380V i 1200 kVA per: Serveis sanitaris, sèptics i altres / Màquines auxiliars de coberta / Ventilació / Aire condicionat i calefacció
- 2 de 690V/230V i 350 kVA per: Equips de navegació, comunicació i ràdio / Serveis d'habilitació, cuina, bugaderia i taller:
- Connexió a port: 690V/380 V i 6200 kVA

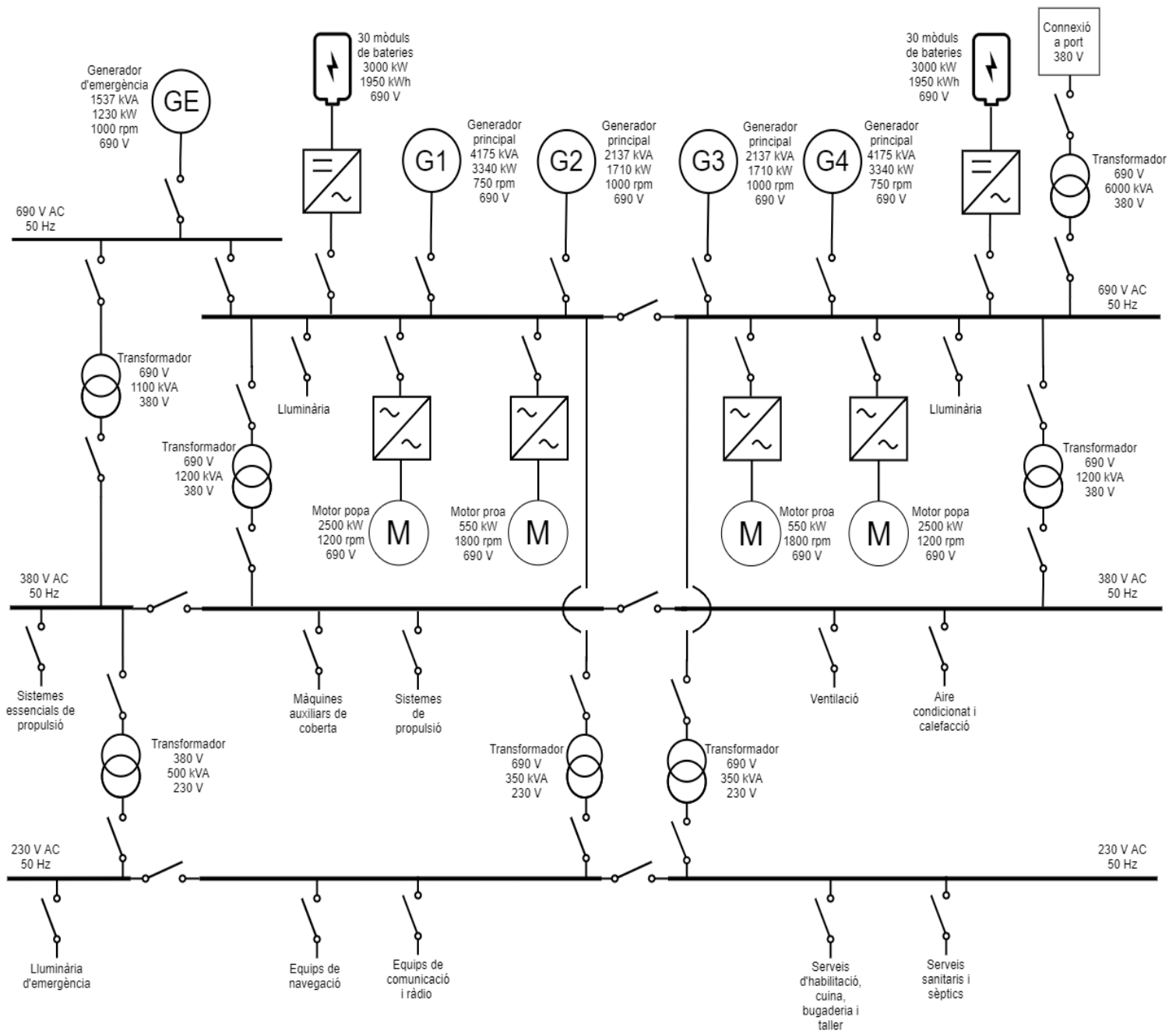
A part, s'hauran d'instal·lar 2 transformadors més per connectar el quadre d'emergència amb els embarrats de 380 V i 230 V. Aquests per això es connectaran de manera que un connecti el quadre d'emergència amb l'embarrat de 380 V i l'altre que connecti aquest últim amb l'embarrat de 230 V. Sabent que els consumidors essencials consumeixen 1050 kVA es disposarà d'un transformador de 690V/380V i 1100 kVA i d'un de 380V/230V i 500 kVA.

De les empreses del sector, ABB disposa d'un catàleg online de petits transformadors de baix voltatge trifàsics des d'on es seleccionaran. El rang de transformació és de 690V a 220V i amb potències sota demanda.



Il·lustració 37: Dibuix del transformador de baix voltatge ABB Font: ABB

4.13 Esquema unifilar



La configuració d'aquest sistema està feta seguint la normativa DNV-GL aplicada. El sistema d'emergència està connectat a tots els sistemes essencials del vaixell com són la propulsió i tots aquells consumidors que es troben a la part esquerra de cada embarrat amb voltatge diferent.

4.14 Modes d'operació del vaixell

Tal i com diu la normativa de la societat de classificació DNV-GL, tots els modes operatius del vaixell han d'estar dissenyats i definits de manera que qualsevol fallada de qualsevol element no afecti permanentment a la propulsió. Cada mode ha de tenir una redundància R1, la qual cosa significa que no pot trigar més de 30 segons en restaurar-se en cas de fallada de qualsevol element.

Els modes són els següents:

4.14.1 Mode dièsel

En aquest mode s'utilitzen els generadors com a font d'energia única de tot el vaixell i és el més normal durant la navegació a alta mar. Normalment les bateries es troben carregades o amb bons nivells de càrrega ja que absorbeixen, lentament, l'energia residual produïda pels generadors i només serveixen per a la compensació de la demanda energètica, la regulació dels pics de potència i la reducció del TDH mencionats anteriorment.

Aquest mode, també, es pot utilitzar en qualsevol moment en que ho requereixin les condicions de navegació tant per emergències o per la no disponibilitat de les bateries.

Durant la navegació diürna s'utilitzen els generadors 1, 2 i 4 i durant la navegació nocturna s'utilitzen tots els generadors amb la possibilitat de la substitució de qualsevol d'aquests pel d'emergència en cas de fallada.

4.14.2 Mode dièsel-elèctric amb descàrrega

Aquest mode consisteix en la utilització dels generadors juntament amb les bateries com a fonts d'energia pel vaixell. Aquest mode es pot donar quan hi han pics de demanda energètica de certa durada que els generadors no poden assolir. Pot ser en el cas de la navegació diürna on s'utilitzen 3 generadors i degut a un pic momentani de potència es prefereix la utilització de les bateries en comptes d'engegar un altre generador.

En el cas de la navegació nocturna pot passar que els 4 generadors no puguin subministrar suficient potència durant un pic de demanda i s'utilitzin les bateries.

També es pot donar el cas que, en l'entrada, estància i sortida de port on es pretén l'ús exclusiu de les bateries, sigui necessària la utilització d'algun dels generadors perquè les bateries no es troben carregades amb la capacitat necessària o perquè el port no és capaç de subministrar la potència requerida.

En condicions d'emergència també es pot utilitzar aquest mode com quan es produeix la fallada d'algun o alguns dels generadors i es tenen les bateries carregades.

Aquest mode utilitza les mateixes combinacions dels generadors que el mode dièsel i, per tant, té la mateixa redundància de seguretat.

4.14.3 Mode dièsel-elèctric amb càrrega

Quan és necessari carregar les bateries ja sigui perquè en el mode dièsel no tenen temps o potència suficient per carregar-se o perquè s'han de carregar per qualsevol altre factor, s'utilitza aquest mode.

Durant la navegació diürna es poden utilitzar els 4 generadors al 100% perquè, aproximadament, poden carregar totes les bateries en 2 hores.

En el cas de la navegació nocturna es pot utilitzar el generador d'emergència per carregar les bateries ja que així ho estableix la normativa. Sempre i quan utilitzant fuel oil. D'aquesta manera es podrien carregar les bateries en 3 hores.

En condicions d'emergència no és recomanable aquest mode ja que la prioritat és retornar a port sense tenir en compte el consum del combustible.

4.14.4 Mode elèctric

Aquest és el mode utilitzat, en condicions normals, per a l'entrada i sortida de port on únicament s'utilitzen les bateries com a font d'energia per a tot el vaixell. Els generadors romanen apagats.

Perquè aquest mode sigui possible en la gran majoria de ports és necessari que, les bateries, estiguin quasi del tot carregades tant a l'hora d'entrar com de sortir de port.

Els generadors durant la navegació i la connexió a terra durant l'estància a port són els encarregats de la càrrega de les bateries.

En condicions d'emergència o de no tenir les bateries suficientment carregades, aquest mode no es possible i s'ha de passar al mode dièsel o dièsel-elèctric.

4.14.5 Mode connectat

Durant les estàncies a port, la planta elèctrica d'aquest vaixell està dissenyada per poder ser subministrada per fins a 5000 kW de potència per al subministrament dels serveis necessaris i la càrrega de les bateries.

Aquest mode contempla mantenir els generadors apagats però només serà possible en aquells ports capacitats per al subministrament d'aquestes magnituds de potència.

Es pot donar el cas d'estar amb aquest mode juntament amb algun dels generadors engegats si fos necessari.

Amb 5000 kW es possible carregar les bateries amb unes 15 hores durant la nit o amb 2 hores durant el dia. Com la nit no dura més de 10 hores, durant les estàncies a port, es preveu que les bateries es poden carregar al 100%.

Capítol 5. Redimensionament del sistema de combustible

El sistema de combustible del que ja disposa el vaixell serveix per una planta propulsora amb consum de fuel oil per part de motors principals i generadors auxiliars. És per això que només s'han de canviar els valors d'aquells elements que ho requereixin deixant el sistema amb el mateix esquema de funcionament. Es redimensionaran els tancs de combustible i les bombes, que degut al canvi de consum, s'han de canviar els seus paràmetres.

El redimensionament del sistema de combustible consistirà en recalculer el volum i el nombre dels tancs i el caudal de les bombes per a la nova planta propulsora híbrida constituïda per generadors. Anteriorment, el volum dels tancs i el caudal de les bombes d'aquest vaixell estaven dimensionats per a 4 motors principals amb un consum total de 1741 l/h i 4 motors auxiliars amb un consum total de 940 l/h durant la navegació. En aquest cas es dimensionarà pels 4 generadors principals i el d'emergència.

El sistema de combustible constava de 4 tancs magatzem, 4 tancs de sedimentació i 4 tancs de servei diari pel fuel, la qual cosa es canviarà juntament amb el seu volum. També consta d'un tanc de residus que s'haurà de recalculer i d'un tanc de pèrdues que es mantindrà igual.

El càlcul es farà per a 4000 milles i 200 hores de navegació tal i com estava pensat anteriorment. El fuel oil que s'utilitzarà serà el nou VLSFO (Very Low Sulfur Fuel Oil) amb baix contingut en sofre (0,5%) ja que la IMO 2020 així ho estableix. Aquest combustible té una densitat de 991 kg/m³ i un poder calorífic, segons s'ha pogut calcular amb el Annex E de la ISO 8217, de 41,2 MJ/kg.

Pel que fa al generador d'emergència, s'utilitzarà dièsel amb una densitat de 867,3 kg/m³ i un poder calorífic de 43 MJ/kg amb el seu propi sistema de combustible.

Pel que fa a les bombes, el sistema consta de 2 bombes de trasbals, 2 bombes d'alimentació de les purificadores i 3 bombes de pressió per a l'alimentació dels generadors. El nombre de bombes es mantindrà, ja que compleix amb la normativa de redundància, canviant el caudal per a un correcte subministrament.

5.1 Càlcul del sistema de combustible

Per tal de recalculer els valors s'han de saber, prèviament, totes les dades que s'hauran d'utilitzar i tots els paràmetres que es voldran seguir.

Com a dades cal saber quin és el consum total dels generadors durant la navegació a la velocitat de servei de 17 kn, ja que durant les maniobres i estàncies a port, en principi, no consumeixen combustible.

Es calcularà la mitjana del consum total durant la navegació diürna i nocturna comptant que els generadors treballen al 100%. El consum de combustible dels generadors és de 0,174 kg/(kWh) i 0,1903 kg/(kWh) de fuel oil amb densitat de 991 kg/m³.

Consum de cada generador a màxima potència:

1	611 l/h
2	345,6 l/h
3	345,6 l/h
4	611 l/h

- Durant la navegació diürna els generadors 1, 2 i 4 consumeixen, al 100%, 1567,7 litres cada hora.
- Durant la navegació nocturna tots els generadors al 100% consumeixen 1913,3 litres cada hora.
- La mitjana entre la navegació diürna i nocturna és de 1740,5 litres cada hora que, en quilograms, són 1724,5 kg/h.

Un cop calculat el consum mitjà, es multiplicarà per les hores de navegació que es volen d'autonomia (200 hores). El consum total és de 348102,9 litres o 344970 kg. Aquest consum equival a 348,1 m³ de volum necessaris que s'hauran de dimensionar en el sistema.

Pel que fa a les bombes, es dimensionaran segons el caudal necessari. El sistema està fet per a utilitzar només 1 bomba de trasbals, 1 d'alimentació de purificadoros i 2 de pressió dels generadors per a un funcionament normal. Les altres són per tenir una correcte redundància en cas de fallada o manteniment.

Paràmetres que tindrà el nou sistema:

- 4 tancs magatzem (TM)
- 2 tancs de sedimentació (TS)
- 2 tancs de servei diari (TSD)
- 1 tanc de residus de combustible (TR)
- 1 tanc de pèrdues (TP)
- 2 bombes de trasbals (BT)
- 2 bombes d'alimentació de purificadoros (BP)
- 3 bombes de pressió pels generadors (BG)

Per calcular el volum dels tancs s'utilitzaran les següents fórmules:

- Per calcular el volum total es determinarà mitjançant la suma dels tancs de magatzem i de sedimentació:

$$Volum\ total = n^{o}TM \times VolumTM + n^{o}TS \times VolumTS$$

- Per calcular el volum total dels tancs de sedimentació es calcularà el consum dels generadors durant 24 hores (12 hores diürnes i 12 nocturnes) amb el 15% més:

$$Volum\ total\ de\ TS = 1,15 \times 24 \times Consum\ dels\ generadors\ mitjà$$

- Per calcular el volum total dels tancs de servei diari es calcularà el consum dels generadors durant 8 hores (4 hores diürnes i 4 nocturnes) amb el 5% més:

$$Volum\ total\ de\ TSD = 1,05 \times 8 \times Consum\ dels\ generadors\ mitjà$$

- Per calcular el volum del tanc de residus es calcularà el 1% consum total durant les 200 hores:

$$Volum\ de\ TR = 0,01 \times 200 \times Consum\ dels\ generadors\ mitjà$$

- El volum del tanc de pèrdues es mantindrà a l'anterior ja que es dimensiona a partir del caudal de la bomba principal de combustible.

Per calcular el caudal de les bombes s'utilitzaran les següents fórmules:

- Per calcular el caudal de les bombes de trasbals s'estimarà que es necessita omplir un tanc de sedimentació en 2 hores:

$$Caudal\ BT = Volum\ TS \div 2$$

- Per calcular el caudal de les bombes d'alimentació de les purificadores s'estimarà el consum total dels generadors principals a màxima potència més un 20%:

$$Caudal\ BP = \sum Consum\ dels\ generadors\ principals\ per\ hora \times 1,2$$

- Per calcular el caudal de les bombes de pressió es dividirà el caudal de les bombes d'alimentació de les purificadores entre 2 ja que s'utilitzen dos en un règim normal:

$$Caudal\ BG = Caudal\ BP \div 2$$

5.1.1 Resultats

Volum dels tancs	Actual	Anterior
Volum tancs de magatzem	4 de 75 m ³ (300 m ³ en total)	688 m ³ en total
Volum tancs de sedimentació	2 de 24 m ³ (48 m ³ en total)	108 m ³ en total
Volum tancs de servei diari	2 de 7,3 m ³ (14,6 m ³ en total)	62 m ³ en total
Volum tancs de residus	1 de 3,5 m ³	1 de 6 m ³
Volum tanc de pèrdues	1 de 3,9m ³	1 de 3,9 m ³

Caudal de cada bomba	m ³ /h
Caudal bomba de trasbals	12
Caudal bomba d'alimentació de purificadores	1,6
Caudal bomba de pressió	0,74

5.2 Càlcul del sistema de combustible d'emergència

El generador d'emergència ha de tenir del seu propi sistema de combustible tal i com diu la normativa mencionada anteriorment a part del principal al que també ha d'estar connectat. La normativa també diu que el generador d'emergència ha de poder engegar-se a 0°C de temperatura amb la qual cosa és recomanable que se li subministri dièsel ja que es tracten de situacions d'emergència. També és recomanable l'ús de dièsel perquè aquest generador es pot engegar a port en cas de necessitat energètica.

Per tant es dimensionarà un tanc de combustible dièsel i una bomba de pressió per al generador d'emergència. En aquest cas, segons la normativa, al tractar-se d'un sistema d'emergència no és necessari aplicar redundància als elements actius.

El tanc es dimensionarà per poder subministrar combustible al generador d'emergència suposant que funciona a màxima potència durant un mínim de 36 hores ja que així ho estableix la normativa.

- Per calcular el volum del tanc de dièsel (TD) es calcularà el consum del generador d'emergència a màxima potència durant 36 hores amb el 15% més:

$$Volum TD = 1,15 \times 36 \times Consum del generador d'emergència per hora$$

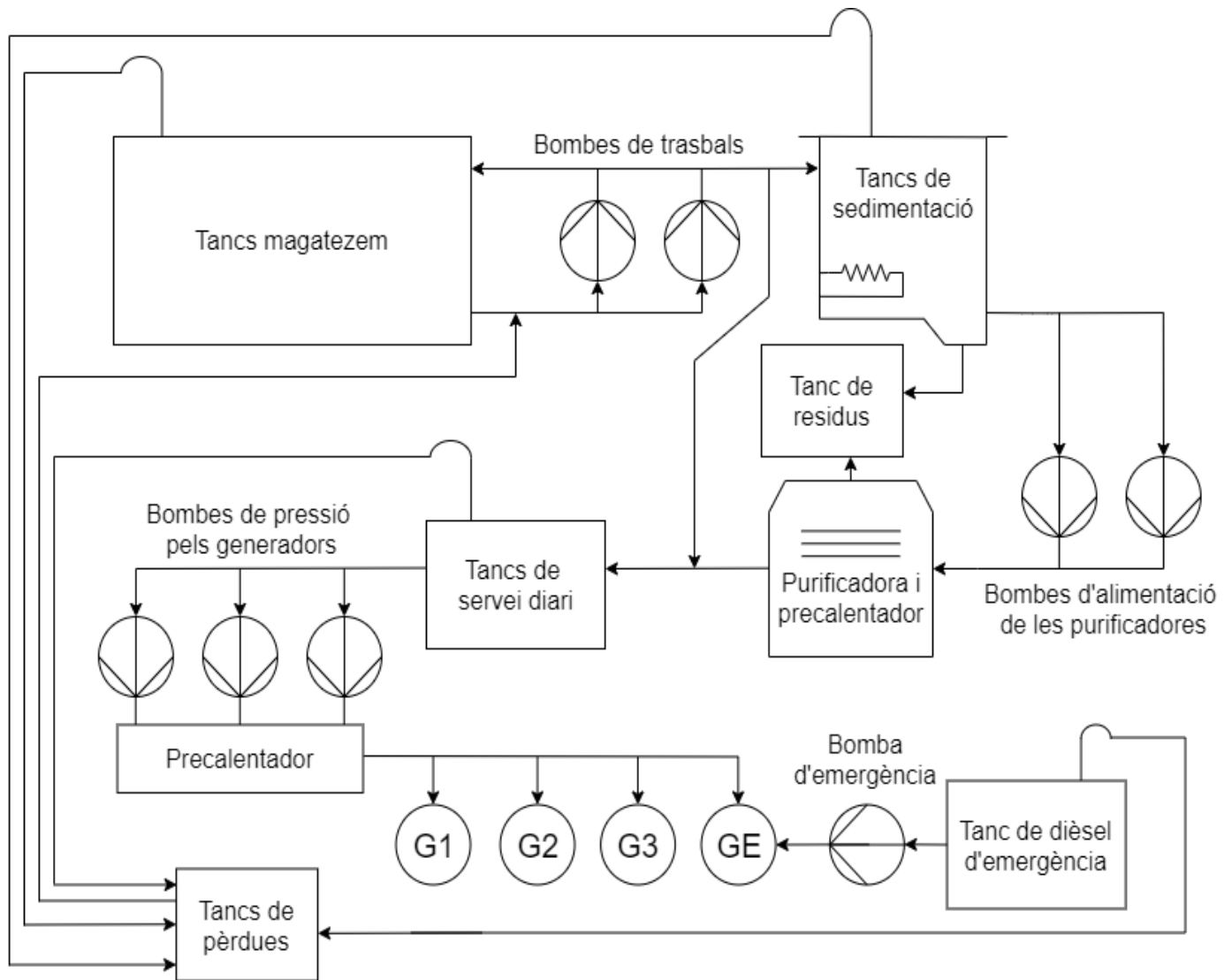
- Per calcular el caudal de la bomba de pressió d'emergència (BPE) s'utilitzarà el consum per hora del generador d'emergència amb un 20% més:

$$Caudal BPE = 1,2 \times Consum del generador d'emergència per hora$$

5.2.1 Resultats

Volum del tanc de dièsel	12 m ³
Caudal de la bomba de pressió d'emergència	0,35 m ³ /h

5.3 Quadre esquemàtic del sistema de combustible



Capítol 6. Disposició de la planta propulsiva

Un cop dimensionat el sistema propulsiu i redimensionat el sistema de combustible cal disposar-los correctament en el vaixell complint amb la normativa de la societat de classificació mencionada anteriorment.

S'utilitzaran el plànols del vaixell de les cobertes 1 i 2 ja que és on es troba tota la maquinaria propulsiva i el sistema de combustible. Tot el que són aspiracions de sentines s'aniran modificant de lloc segons sigui convenient.

Primer de tot cal saber les dimensions i el pes de tots els elements per tal de poder fer un correcte disseny de la càmera de màquines mantenint l'estabilitat del vaixell.

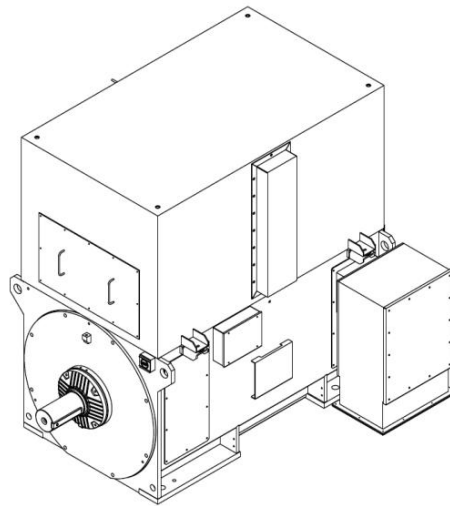
Un cop es saben les dimensions i els pesos de tots els elements que s'instal·laran, també cal saber els pesos i les localitzacions de tots aquells altres elements que es desinstal·laran per calcular el centre de gravetat del conjunt i mantenir-lo igual per no alterar l'estabilitat del vaixell.

És a dir, es calcularan els centres de gravetat XG i ZG del conjunt d'elements (maquinaria, tancs de combustible i components d'aquest) que es desinstal·laran per tal de que els nous elements tinguin els mateixos valors i no alterin l'estabilitat del vaixell. El YG no és necessari ja que tots aquests elements estan duplicats de manera simètrica en els dos costats del vaixell i els nous elements que s'instal·laran també ho estaran.

6.1 Dimensions i pesos de la maquinaria

6.1.1 Motor INDAR ACP-500-S/6 de 2500 kW

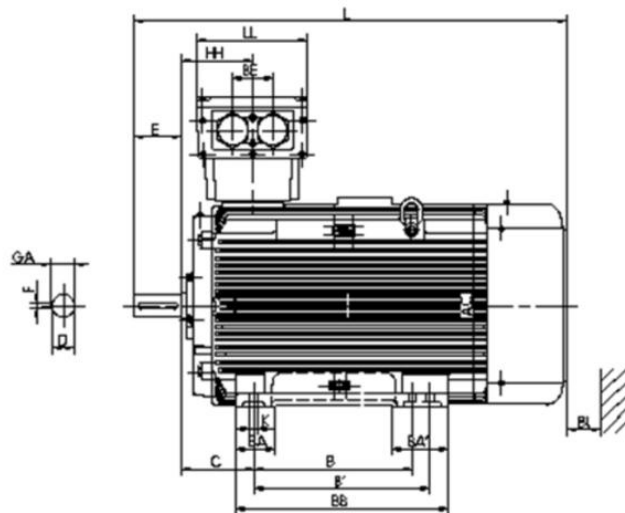
- Amplada: 1,745 m
- Longitud: 2,46 m
- Altura: 2,025 m
- Pes: 5900 kg



Il·lustració 38: Esquema del motor INDAR 2500 kW Font: Ingeteam

6.1.2 Motor VEM Motors IE2-WE2R 355 L4 NS LL HW de 550 kW

- Amplada: 0,7 m
- Longitud: 1,69 m
- Altura: 1,084 m
- Pes: 2500 kg



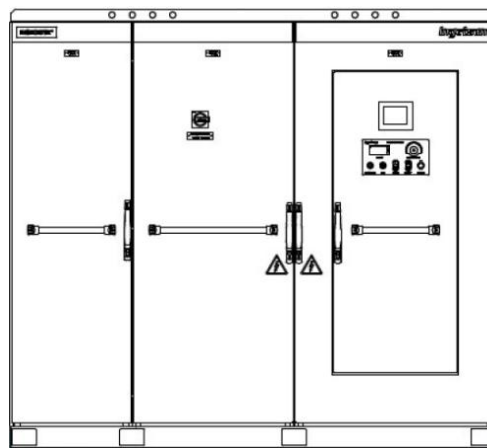
Il·lustració 39: Esquema del motor VEM 550 kW Font: VEM Group

6.1.3 Convertidor de freqüència INGEDRIVE LV4F-32-851WA de 2880 kW

- Amplada: 3,21 m
- Longitud: 0,605 m
- Altura: 2,205 m
- Pes: 4950 kg

6.1.4 Convertidor de freqüència INGEDRIVE LV400 de 690 kW

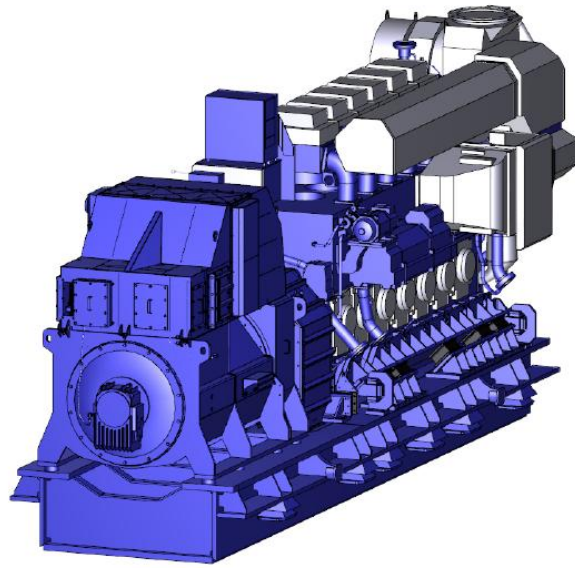
- Amplada: 2,41 m
- Longitud: 0,605 m
- Altura: 1.955 m
- Pes: 1700 kg



Il·lustració 40: Esquema del convertidor de freqüència INGEDRIVE de la gama Font: Ingeteam

6.1.5 Generador Wärtsilä 6L32 de 3340 kW

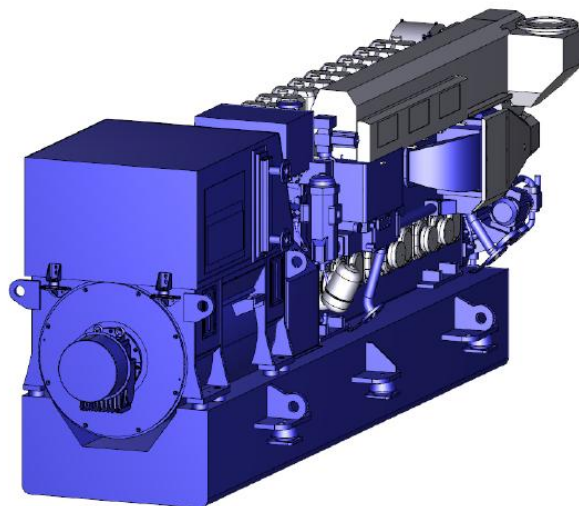
- Amplada: 2,73 m
- Longitud: 8,902 m
- Altura: 3,815 m
- Pes: 57000 kg



Il·lustració 41: Esquema del generador Wärtsilä 3340 kW Font: Wärtsilä

6.1.6 Generador Wärtsilä 9L20 de 1710 kW

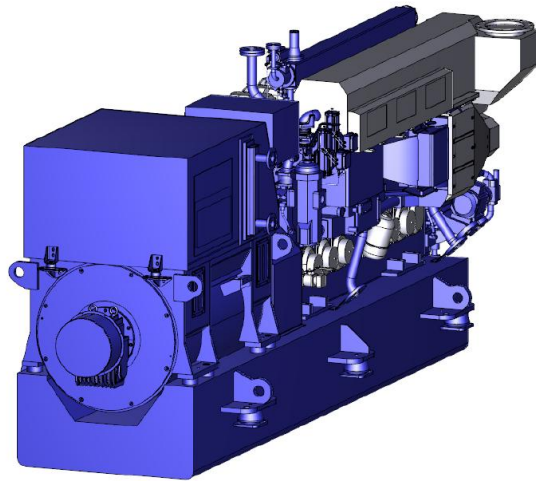
- Amplada: 2,01 m
- Longitud: 5,550 m
- Altura: 2,457 m
- Pes: 23800 kg



Il·lustració 42: Esquema del generador Wärtsilä 1710 kW Font: Wärtsilä

6.1.7 Generador Wärtsilä 8L20DF de 1230 kW

- Amplada: 2,01 m
- Longitud: 5,325 m
- Altura: 2,791 m
- Pes: 23700 kg



Il·lustració 43: Esquema del generador Wärtsilä 1230 kW Font: Wärtsilä

6.1.8 Bateries (cada mòdul ABB CESM de 100 kW)

- Amplada: 1,8 m
- Longitud: 0,6 m
- Altura: 2 m
- Pes: 1100 kg

6.1.9 Transformadors ABB

350 kVA:

- Amplada: 1 m
- Longitud: 1 m
- Altura: 1,5 m
- Pes: 1100 kg

500 kVA:

- Amplada: 1 m
- Longitud: 1 m
- Altura: 1,5 m
- Pes: 1300 kg

Pels de 1100 kVA i 1200 kVA es faran aproximacions a partir del transformador de 1000 kVA ja que no hi ha dades dels de potències superiors.

- Amplada: 1,2 m
- Longitud: 1,2 m
- Altura: 1,75 m
- Pes: 2300 kg

Pel transformador de la connexió a port s'aproximarà amb un volum del doble d'un transformador de 1000 kVA.

- Amplada: 1,2 m
- Longitud: 2,4 m
- Altura: 1,75 m
- Pes: 4600 kg

6.1.10 Reductora

Pel que fa a les reductores s'utilitzaran les mateixes mesures d'amplada de les que ja estan instal·lades canviant la longitud ja que en aquest cas només seran engranades per un motor.

6.2 Dimensions i pesos dels tancs de combustible

6.2.1 Tancs magatzem (fuel de 0,991 kg/cm³)

- 75 m³
- 74,5 tones

6.2.2 Tancs de sedimentació (fuel de 0,991 kg/cm³)

- 24 m³
- 23,8 tones

6.2.3 Tancs de servei diari (fuel de 0,991 kg/cm³)

- 7,3 m³
- 7,24 tones

6.2.4 Tanc d'emergència (dièsel de 0,867 kg/cm³)

- 11,9 m³
- 10,3 tones

6.3 Centres de gravetat del sistema antic

A continuació es mostraran les taules de la maquinaria i els tancs de combustible que es desinstal·laran amb els seus pesos i centres de gravetat segons ja estava dissenyat:

6.3.1 Maquinaria antiga

Maquinaria	Pes (kg)	XG (m)	ZG (m)
Motors propulsors	134000	12,1	3
Auxiliars motor-alternador	97000	16,137	3
Reductores	20000	20,403	3
Màquines auxiliars	82000	3,402	3
Calderes	15000	12,215	3
Sala de control i transformadors	30000	-2,1	5
Total	378000	10,57	3,16

Taula 14: Maquinaria antiga

6.3.2 Sistema de combustible antic

El pes dels tancs de combustible està determinat pel tipus de fuel anteriorment utilitzat amb una densitat de $0,942 \text{ kg/cm}^3$.

Combustible	Pes (kg)	XG (m)	ZG (m)
Magatzem 1,2	412596	-18,90	3,4
Magatzem 2,3	236178,24	-11,77	3,4
Sedimentació 1,2	45046,44	-8,41	3,4
Sedimentació 3,4	57405,48	-6,11	3,4
Servei diari 1,2	15015,48	-8,41	3,4
Servei diari 3,4	19135,16	-6,45	3,4
Bombes	20000	-8,7	3
Purificadores	4000	-10,2	3
Total	809376,8	-14,54	3,39

Taula 15: Sistema de combustible antic

El total dels XG i els ZG de tots aquests elements és:

- XG: -6,55 m
- ZG: 3,32 m

6.4 Procés de disposició

A partir d'aquí s'iniciarà el procés d'instal·lació de tots els elements nous començant pels que tenen menys marge de disposició i acabant pels que ofereixen més varietat d'opcions. És a dir, es començarà per la instal·lació de la maquinària propulsiva i s'acabarà amb el sistema de combustible.

En la coberta 1 es situaran les reductores, motors, convertidors de freqüència, generadors i tots els elements del sistema de combustible. En la coberta 2 es situaran la sala de quadres de control i distribució i el compartiment de les bateries.

Cada reductora es situarà en el mateix lloc que les anteriors seguida dels motors elèctrics situats també, en el mateix lloc que els motors de combustible anteriors. Els convertidors de freqüència dels motors principals aniran seguits perpendicularment del conjunt reductora-motor amb un cert espai per permetre la operativitat i el manteniment. Els convertidors de freqüència dels motors de proa aniran just al costat.

Els generadors es situaran en el compartiment més central del vaixell on es trobava la maquinària auxiliar ja que és on hi ha la major amplada i el centre de gravetat XG. Es situaran paral·lelament a la línia de crugia ja que així ho determina la normativa.

S'utilitzarà el mateix sistema d'escapament de gasos dissenyat per la maquinària auxiliar de l'anterior sistema propulsiu localitzat justament a la part superior, a l'altura de la coberta 2.

Per mantenir el YG, els generadors 2 i 3 de 2137,5 KVA es situaran a la part més externa del compartiment justament al costat dels estabilitzadors mantenint la mateixa distància. Els generadors 1 i 4 es situaran a la part més interna del compartiment amb la mateixa distància respecte la línia de crugia i el generador d'emergència es situarà justament sobre d'aquesta.

Amb aquesta distribució es fa del tot necessari redissenyar la sala de quadres de control i distribució ja que no hi cap en el compartiment on estava anteriorment. És per això que, en la coberta 2 justament a sobre on es trobaven els tancs de combustible, es localitzarà la nova sala de quadres de control i distribució més gran que l'anterior i amb els transformadors del sistema elèctric. Aquest espai s'ha tornat disponible degut a la reducció dels tancs del sistema de combustible els quals se'ls hi redueix l'altura.

Aquesta mesura s'ha pres respectant els apartats de la normativa que citen que el quadre d'emergència ha d'estar el més pròxim possible a la font d'energia d'emergència i ha de ser accessible des de coberta ja que es troba a 2 metres del generador d'emergència baixant unes escales i justament amb accés directe al resta de cobertes per la tripulació.

També es compleix en que els quadres de distribució principals han d'estar en llocs de fàcil accés amb sortides d'emergència, ben ventilats i sense proximitat amb elements que desprenguin molta calor o puguin tenir fuites de líquids. La sala en qüestió disposa de dos accessos directes, un a la sala de màquines i l'altre al compartiment del sistema de combustible. Ambdós tenen accés a la coberta número 3 destinada únicament a la tripulació.

Pel que fa a les distàncies mínimes d'altura i amplada de passadissos també s'han tingut en compte segons les especificacions.

Pel que fa a les bateries, s'han instal·lat en una nou compartiment situat a la coberta 2 justament a sobre dels motors i les reductores. Això ha estat possible ja que anteriorment aquest espai estava únicament ocupat pel sistema d'escapament de gasos dels motors principals el qual s'ha eliminat ja que no és necessari.

Les bateries s'han disposat en 2 grups tal i com estava especificat anteriorment i centràticament a la línia de crugia per mantenir el centre de gravetat YG. Cada grup disposa d'una amplada de més de 1,5 m per permetre la correcta operativitat i el manteniment.

Aquest nou compartiment s'ha d'adequar en quant a les condicions de ventilació descrites per la normativa. La resta de citacions es compleixen ja que és un compartiment accessible des de la coberta 1, està cobert i protegit, no és un lloc per passatgers, no hi ha elements d'altres sistemes ni fonts calentes o amb alt risc d'incendi, disposa de porta contra incendis amb tancada d'emergència automàtica i té la mateixa integritat estructural que la resta del vaixell.

A continuació es calcularà el sistema de ventilació pel compartiment de les bateries segons la normativa seguint els passos especificats:

- a) Càlcul del flux d'aire de ventilació necessari en m^3/h (Q):

$$Q = f \times 0,25 \times I \times n$$

On:

- f: 0,11
- n: Número de mòduls (60)
- I: Corrent de càrrega màxima (1900 A)

Resultat: $Q = 3135 \text{ m}^3/\text{h}$

- b) Càlcul de la secció necessària en cm^2 (A) dels conductes de ventilació assumint una velocitat de 0,5 m/s:

$$A = 5,6 \times Q$$

Resultat: $A = 1,8 \text{ m}^2$

S'instal·laran dos conductes de ventilació forçada cap a l'exterior de $0,9 \text{ m}^2$ cada un.

Un cop instal·lada tota la maquinària propulsiva en els diferents compartiments de la coberta 1 i 2 és necessari saber els centres de gravetat XG i ZG del nou conjunt per tal de resoldre les possibles diferències que puguin haver amb els anteriors.

6.4.1 Maquinaria nova

Maquinaria	Pes (kg)	XG (m)	ZG (m)
Motors propulsors	11800	16,5	3
Reductores	20000	19,2	3
Convertidors de freqüència	13300	12,7	3
Generadors	185300	1	3
Bateries 1	33000	18,5	6,5
Bateries 2	33000	14	6,5
Sala de control	14000	-8,5	5
Transformadors 1,2,3,4	6800	-6,3	5
Transformadors 5,6,7	8200	-5,5	5
Total	325400	5,53	3,89

Taula 16: Maquinaria nova

A partir d'aquí ja es pot començar la disposició dels tancs de combustible, bombes i purificadores del propi sistema compensant el centres de gravetat XG i ZG perquè coincideixin amb els anteriors (XG: -6,55 m/ ZG: 3,32m).

Els 4 tancs magatzem es disposaran en el compartiment on es trobaven els 2 tancs magatzem antics més grans ja que són els conjunts més pesats i voluminosos del sistema de combustible i el compartiment en qüestió ja està dissenyat per suportar aquests valors. Just a popa dels 4 tancs magatzem, al següent compartiment on estaven disposats la resta de tancs i elements de l'anterior sistema, es disposaran els tancs de sedimentació, els tancs de servei diari, el tanc d'emergència, les bombes del sistema i les purificadores.

La distribució es farà segons el valor total del centre de gravetat XG perquè coincideixi amb l'anterior. EL ZG no és possible modificar-lo ja que tot el sistema de combustible es troba a la mateixa altura que l'anterior.

Un cop provades les diferents opcions de distribució de tots aquests elements del sistema de combustible, s'ha trobat aquella que manté el centre de gravetat XG igual que l'anterior. El centre ZG, degut a la introducció de les bateries en un compartiment més elevat que la resta de la maquinaria, no és possible fer que coincideixi exactament amb l'anterior però, la diferència és mínima i no suposa canvis en l'estabilitat del vaixell.

Les bombes de trasbals, les bombes de purificadores i les mateixes purificadores s'han situat a proa del compartiment seguides dels tancs de sedimentació, el tanc d'emergència i els tancs de servei diari respectivament. Les bombes de pressió s'han situat just a continuació del tanc d'emergència sobre la línia de crugia.

6.4.2 Sistema de combustible nou

El pes dels tancs de combustible està determinat pel tipus de fuel que s'utilitzarà amb una densitat de $0,991 \text{ kg/cm}^3$. Pel que fa el tanc de dièsel d'emergència la densitat és de $0,867 \text{ kg/cm}^3$.

Combustible	Pes (kg)	XG (m)	ZG (m)
Magatzem 1,2	148682,07	-21,1	3,4
Magatzem 2,3	148682,07	-16,8	3,4
Sedimentació 1,2	47605,86	-9,5	3,4
Servei diari 1,2	14488,74	-7,1	3,4
Emergencia	10336,03	-7	3,4
Bombes	12000	-12,78	3
Bombes pressió	8000	-4,9	3
Purificadora	4000	-12,8	3
Total	393794,77	-16,52	3,38

Taula 17: Sistema de combustible nou

En total els nous centres de gravetat són els següents:

- XG: -6,55 m
- ZG: 3,62 m

El centre de gravetat XG és el mateix que l'anterior i el ZG lleugerament superior ja que no es pot fer res i tampoc compromet a l'estabilitat del vaixell. Pel que fa al pes total dels dos sistemes, es redueix en 468,5 tones tot el conjunt. Això significaria modificació del desplaçament del vaixell i, en conseqüència, del calat.

El desplaçament passa de ser 8615 t a 8147 t i el calat de 5,4 m a 5,25 m.

Pel que fa els motos de proa, es substituiran pels que hi havia anteriorment, cosa que no suposarà variació en el pes i els centres de gravetat XG i ZG.

Els motors de proa es disposaran horitzontalment i perpendicularment a les hèlix ja que a la part superior es troba un tanc de llast i resulta impossible posar-los de forma vertical. Estaran units mitjançant engranatges cònics com els de la següent il·lustració.



Il·lustració 44: Engranatges dels motors de proa Font: PNGOcean

La disposició del nou sistema propulsiu i del nou sistema de combustible queda representada en els plànols annexats a continuació (A.5). Els plànols en qüestió representen les cobertes 1 i 2 i el perfil del vaixell on queden disposats tots els nous elements.

Capítol 7: Emissions i cost del sistema propulsiu

En aquest capítol es calcularan les emissions que generen els generadors i el cost de tot el nou sistema propulsiu. Es compararan ambdós càlculs amb les emissions i els costos del sistema propulsiu anterior, amb les emissions d'altres tipus de creuers similars i, també, amb els compliments de les normatives per aquest tipus de vaixell.

Respecte del sistema propulsiu anterior es coneixen les dades de consum de cada mode de navegació. A partir d'aquí es calcularan les emissions de CO₂ que generava consumint un fuel oil diferent al que es consumirà en aquets nou cas degut a la nova normativa del contingut de sofre.

També es coneix el cost de tota la maquinaria propulsiva antiga per tal de poder fer un càlcul exacte sobre el canvi del cost del conjunt.

Cal destacar que, com ja s'ha dit en el capítol 2, l'anterior planta propulsiva contava amb una potència principal total de 19255 kW repartits entre 4 motors i 5 generadors que consumien 200 g/kWh. La nova planta propulsora conta amb una potència principal total mecànica per part dels generadors de 10560 kW repartits amb 4 generadors amb un consum mitjà de 179 g/kWh.

7.1 Emissions

Les emissions són un punt molt important de les plantes propulsors dels vaixells ja que estan regulades per normatives internacionals i europees. Els vaixells han de complir amb l'índex d'emissions de CO₂ anomenat EEDI i, actualment, des de principis del 2020, els combustibles no poden tenir més del 0,5% de sofre.

L'EEDI augmenta cada 5 anys i els vaixells, segons el seu tipus, l'han de complir basant-se en els seus GT, carga transportada i velocitat. Aquest vaixell però, no ha de complir amb l'EEDI ja que té menys de 10000 GT.

A més, a partir del 2018, els vaixells amb més de 5000 GT que naveguen entre ports europeus (com és el cas), se'ls hi aplica el MRV (Monitoring, Reporting & Verification) que consisteix en monitoritzar i reportar a la Comissió Europea totes les emissions de CO₂ emeses detallant els trajectes i la carga transportada per determinar el factor d'eficiència que tenen. Totes aquestes dades han d'estar verificades per societats de classificació com és el cas de DNV-GL i estan publicades a la base de dades de l'EMSA sobre el MRV.

En el MRV s'ha de reportar el coeficient EEDI (encara que no hagi de complir amb cap valor), el coeficient d'emissions per distància, el coeficient d'emissions per carga transportada o passatger i distància i el valor del total d'emissions generades entre tots els trajectes realitzats.

És per això que a continuació es calcularan totes aquestes dades de l'antiga i la nova planta propulsora i es compararan tal i com s'ha dit anteriorment. Es calcularan de manera aproximada i teòrica ja que els càlculs exactes del MRV es duen a terme durant la navegació.

7.1.1 Emissions de l'antiga planta propulsora

L'antiga planta propulsora es va dissenyar al 2003 on els consums de combustible i les emissions de CO₂ no eren tant importants ni estaven tant controlades. El fuel oil utilitzat tenia una densitat de 942 kg/m³ i un percentatge de 3,114 kilograms de CO₂ per cada kilogram de combustible consumit.

Abans no s'havia de complir amb el MRV però, tot i així, a continuació es calcularan tots els coeficients del MRV per tal de comparar-los amb la nova planta propulsora.

Càlculs

Durant la navegació tant de dia com de nit s'utilitzaven els 4 motors al 81% per navegar a 19 kn, cosa que suposava un consum de 7711,2 kW mecànics amb un consum de 1637,2 kg/h de combustible. De dia s'utilitzaven 2 generadors que proporcionaven 4096 kW i de nit 4 que proporcionaven 5981 kW.

A continuació es mostraran els consums de fuel oil i emissions de CO₂ per part dels generadors i dels motors durant cada règim de navegació.

Consum i emissions dels generadors antics	Navegant	Maniobrant	Port	
kW utilitzats durant el dia	4096	5556	2970	kW
kW utilitzats durant la nit	5981	7440	4855	kW
kg/h de fuel oil consumit durant el dia	869,64	1179,62	630,57	kg/h fuel oil
kg/h de fuel oil consumit durant la nit	1269,85	1579,62	1030,79	kg/h fuel oil
kg/h de CO ₂ emesos durant el dia	2708,06	3673,33	1963,61	kg/h CO ₂
kg/h de CO ₂ emesos durant la nit	3954,32	4918,93	3209,87	kg/h CO ₂

Taula 18: Consum i emissions dels generadors de l'antiga planta propulsora

Consum i emissions dels motors antics	Navegant	Maniobrant	Port	
kW utilitzats durant el dia	7711,2	2018,6	0	kW
kW utilitzats durant la nit	7711,2	2018,6	0	kW
kg/h de fuel oil consumit durant el dia	1637,20	428,58	0	kg/h fuel oil
kg/h de fuel oil consumit durant la nit	1637,20	428,58	0	kg/h fuel oil
kg/h de CO ₂ emesos durant el dia	5098,23	1334,59	0	kg/h CO ₂
kg/h de CO ₂ emesos durant la nit	5098,23	1334,59	0	kg/h CO ₂

Taula 19: Consum i emissions dels motors de l'antiga planta propulsora

A partir d'aquestes dades es calcularan els totals dels consums i emissions juntament amb tots els coeficient que s'han de calcular per tal de complir amb el MRV.

Total	Navegant	Maniobrant	Port	A 19 kn
kW utilitzats durant el dia	11807,2	7574,6	2970,0	kW
kW utilitzats durant la nit	13692,2	9458,6	4855,0	kW
kg/h de fuel oil consumit durant el dia	2506,8	1608,2	630,6	kg/h fuel oil
kg/h de fuel oil consumit durant la nit	2907,0	2008,2	1030,8	kg/h fuel oil
kg/h de CO2 emesos durant el dia	7806,3	5007,9	1963,6	kg/h CO2
kg/h de CO2 emesos durant la nit	9052,6	6253,5	3209,9	kg/h CO2
Coeficient EEDI durant el dia (gCO2/tmn)	47,691	83,043	0,000	gCO2/tmn
Coeficient EEDI durant la nit (gCO2/tmn)	55,305	103,698	0,000	gCO2/tmn
Coeficient d'emissions per distància durant el dia (kgCO2/mn)	410,86	715,42	0,00	kgCO2/mn
Coeficient d'emissions per distància durant la nit (kgCO2/mn)	476,45	893,36	0,00	kgCO2/mn
Coeficient d'emissions per passatger i distància durant el dia (gCO2/pas mn)	1643,43	2861,67	0,00	gCO2/pas mn
Coeficient d'emissions per passatger i distància durant la nit (gCO2/pas mn)	1905,80	3573,44	0,00	gCO2/pas mn

Taula 20: Consums i coeficients totals de les emissions de l'antiga planta propulsora

7.1.2 Emissions de la nova planta propulsora

La nova planta propulsora dissenyada al 2020 ha de complir amb el contingut de sofre i el MRV. A continuació es calcularan tots els coeficients del MRV i els consums del VLSFO durant la navegació ja que maniobrant i a port no ha de consumir combustible en condicions normals.

Els coeficient del MRV teòrics que es calcularan seran superiors als que s'estimen durant les rutes de navegació reals ja que, durant les entrades, sortides i maniobres a port no es consumeix combustible i es segueix transportant passatgers i recorrent certes distàncies cosa que suposa una certa reducció de les emissions per distància i passatgers.

Càlculs

Primer de tot es calcularà, en detall, els consums del combustible principal que s'utilitzarà, el VLSFO (Very Low Sulfur Fuel Oil) que és un fuel oil pesat amb un contingut de sofre inferior a 0,5%.

Després es mostraran els consums i les emissions juntament amb tots els coeficient que s'han de calcular per tal de complir amb el MRV, tal qual s'ha fet per l'antiga planta propulsora a diferència que en aquest cas només serà durant el règim de navegació.

A continuació es detallaran els percentatges dels components del combustible i el consum dels kilograms per hora que es consumeixen durant la navegació de dia i de nit a 17 kn.

Contingut del VLSFO	Dia	Nit	A 17 kn
Sofre 0,5%	7,8	9,5	kg/h
Sulfur d'hidrogen 0,2%	3,1	3,8	kg/h
Sediments 0,4%	6,2	7,6	kg/h
Residus de micro carboni 18%	279,6	341,3	kg/h
Aigua 0,5%	7,8	9,5	kg/h
Cendres 0,1%	1,6	1,9	kg/h
Vanadi 35%	543,8	663,6	kg/h
Sodi 10%	155,4	189,6	kg/h
Alumini amb silici 6%	93,2	113,8	kg/h
Calci 3%	46,6	56,9	kg/h
Fòsfor 1,5%	23,3	28,4	kg/h
Zinc 1,5%	23,3	28,4	kg/h
Asfaltens 23,3%	362,0	441,8	kg/h
CO2 3,114 kgCO2/kg	4837,8	5904,5	kg/h
VLSFO	1553,6	1896,1	kg/h

Taula 21: Contingut i consum per hora dels components del VLSFO

Aquest tipus de combustible té una taxa de 3,114 kilograms de CO2 per cada kilogram de combustible consumit. A partir d'aquesta dada i dels consums totals es faran tots els càlculs destinats al MRV.

A continuació es mostraran els consums de fuel oil i els coeficients d'emissions de CO2 per part dels generadors durant la navegació. Els kW utilitzats són mecànics per part dels generadors.

Consum i emissions dels nous generadors	Navegant	A 17 kn
kW utilitzats durant el dia	8584,80	kW
kW utilitzats durant la nit	10560,00	kW
kg/h de fuel oil consumit durant el dia	1522,51	kg/h fuel oil
kg/h de fuel oil consumit durant la nit	1896,12	kg/h fuel oil
kg/h de CO2 emesos durant el dia	4741,09	kg/h CO2
kg/h de CO2 emesos durant la nit	5904,52	kg/h CO2
Coeficient EEDI durant el dia (gCO2/tmn)	32,37	gCO2/tmn
Coeficient EEDI durant la nit (gCO2/tmn)	40,32	gCO2/tmn
Coeficient d'emissions per distància durant el dia (kgCO2/mn)	278,89	kgCO2/mn
Coeficient d'emissions per distància durant la nit (kgCO2/mn)	347,32	kgCO2/mn
Coeficient d'emissions per passatger i distància durant el dia (gCO2/pas mn)	1115,55	gCO2/pas mn
Coeficient d'emissions per passatger i distància durant la nit (gCO2/pas mn)	1389,30	gCO2/pas mn

Taula 22: Consums i coeficients totals de les emissions de la nova planta propulsora

7.1.3 Comparació dels consums i les emissions

Tot i que les velocitats de servei són diferents i, per tant, els kW mecànics utilitzats i els consums canvien notablement, els coeficients sobre les emissions tenen en compte la distància recorreguda, els GT i el nombre de passatgers, la qual cosa són comparables en qualsevol velocitat.

Només sabent que els consums dels antics motors i generadors eren de 200 g/kWh i els dels nous generadors de 179 g/kWh de mitjana, ja es pot saber que, per a mateixos kW mecànics utilitzats, les emissions de CO2 sempre seran inferiors per part del nou sistema propulsiu.

A més, els motors elèctrics juntament amb els convertidors de freqüència tenen un rendiment conjunt del 92,16%, significativament més elevat que el de qualsevol motor de combustió.

A part de tot això, cal destacar que, la comparació només es farà durant el règim de navegació ja que, durant les altres condicions, la nova planta propulsora no emet emissions de CO2.

A continuació es mostraran les reduccions dels consums de fuel oil i dels coeficients d'emissions de CO2 durant la navegació a 17 kn per part del nou sistema propulsiu.

Reducció dels consums i les emissions	Navegant	A 17 kn
kW utilitzats durant el dia	-3222,4	kW
kW utilitzats durant la nit	-3132,2	kW
kg/h de fuel oil consumit durant el dia	-984,3	kg/h fuel oil
kg/h de fuel oil consumit durant la nit	-1010,9	kg/h fuel oil
kg/h de CO ₂ emesos durant el dia	-3065,2	kg/h CO ₂
kg/h de CO ₂ emesos durant la nit	-3148,0	kg/h CO ₂
Coeficient EEDI durant el dia (gCO ₂ /tmn)	-15,3	gCO ₂ /tmn
Coeficient EEDI durant la nit (gCO ₂ /tmn)	-15,0	gCO ₂ /tmn
Coeficient d'emissions per distància durant el dia (kgCO ₂ /mn)	-132,0	kgCO ₂ /mn
Coeficient d'emissions per distància durant la nit (kgCO ₂ /mn)	-129,1	kgCO ₂ /mn
Coeficient d'emissions per passatger i distància durant el dia (gCO ₂ /pas mn)	-527,9	gCO ₂ /pas mn
Coeficient d'emissions per passatger i distància durant la nit (gCO ₂ /pas mn)	-516,5	gCO ₂ /pas mn

Taula 23: Reducció dels consums i les emissions per part de la nova planta propulsora

Es pot observar que la reducció dels coeficients d'emissions de CO₂ són molt importants i comporten una notable reducció de la contaminació atmosfèrica.

En quant a la comparació de les emissions de creuers és complicat dur-la a terme exactament ja que, aquests, la monitoritzen durant la navegació i els seus valors són reals. A més, aquest creuer és de luxe i dissenyat al 2003, la qual cosa significa que els consums elèctrics són més elevats que els actuals.

Tot i així, a continuació es mostraran una sèrie de creuers amb els seus coeficients d'emissions de CO₂ segons la base de dades del MRV per part de l'EMSA.

Nom	Passatgers	EEDI	Emissions per distància	Emissions per passatger i distància
RCGS Resolute	184	22,5 gCO ₂ /t mn	267,4 kgCO ₂ /mn	2068,81 gCO ₂ /pas mn
Le Lyrial	264	21,8 gCO ₂ /t mn	266,47 kgCO ₂ /mn	1456,93 gCO ₂ /pas mn
Le Boreal	264	21,9 gCO ₂ /t mn	277,87 kgCO ₂ /mn	1362,7 gCO ₂ /pas mn
Ocean Majesty	535	31,7 gCO ₂ /t mn	382,91 kgCO ₂ /mn	1124,27 gCO ₂ /pas mn
MV Gemini	1074	30 gCO ₂ /t mn	611,4 kgCO ₂ /mn	813,29 gCO ₂ /pas mn

Taula 24: Coeficients d'emissions de CO₂ de creuers similars segons l'EMSA

Es pot observar que, per creuers amb el número de passatgers similar, les emissions per passatger i distància són inferiors mentre que l'EEDI és superior. Això és degut a que els càlculs fets són teòrics i no es tenen en compte les zero emissions durant les estàncies a port.

També s'observa que, en quant el número de passatgers augmenta, el coeficient d'emissions per passatger i distància disminueix, ja que, com és lògic, és més rentable portar un nombre elevat de passatgers a bord tot i que, per a creuers de luxe, és difícil.

En conclusió es pot dir que, el nou sistema propulsiu, disminueix significativament les emissions de CO₂ (un 40%) i els consums de combustible respecte l'anterior disseny durant la navegació i permet les zero emissions durant les entrades, sortides i estàncies a port cosa que influeix molt en la reducció de la contaminació de les grans ciutats.

7.2 Costos

El preu de la maquinaria és un factor clau en els dissenys dels sistemes, sobretot en aquells que són nous i el cost és bastant desconegut. En aquest cas, no ha estat fàcil trobar els preus de tots els elements, tot i que finalment s'han aconseguit bones aproximacions, ja que les empreses del sector no donen aquests tipus de dades obertament.

Pel que fa a l'anterior sistema propulsor, els preus s'han pogut obtenir detalladament per tal de comparar-los amb el dels nous elements.

A continuació es detallaran els preus que s'han pogut obtenir per part de les empreses Ingeteam i ABB de tots els nous elements del sistema propulsor:

- Motors propulsors: Els motors propulsors de 2500 kW tenen un preu de 115.000€ cada un segons l'empresa Ingeteam.
- Reductores: El preu de les reductores s'ha estimat a partir de les anteriors i les noves característiques que han obtingut. S'obté un preu de 446.437€ en total.
- Convertidors de freqüència: Els convertidors de freqüència de 2880 kW tenen un preu de 200.000€ cada un i els de 690 kW de 100.000€ segons l'empresa Ingeteam.
- Generadors: El preu dels generadors s'ha pogut obtenir per separat. Els alternadors de 3340 kW tenen un preu de 230.000€ cada un i els de 1710 kW i 1230 kW de 120.000€ segons l'empresa Ingeteam. El preu dels motors s'ha estimat segons el preu dels antics grups generadors amb un cost de 500.000€ pels de 3340 kW i 300.000€ pels de 1710 kW i 1230 kW.
- Bateries: Cada mòdul de bateries té un cost de 25.000€ segons l'empresa ABB amb un cost total, per part dels 60 mòduls, de 1.500.000€.
- Sala de control: El preu de la sala de control s'ha estimat segons el preu de l'antiga sala amb un cost total de 33.500€.
- Transformadors: Els transformadors tenen un preu total de 140.000€ segons l'empresa Ingeteam.
- Motors de proa: El cost dels motors de proa s'ha estimat amb el mateix que l'anterior amb un cost total de 95.000€.

El cost total de la nova maquinaria ve determinat amb la següent taula:

Maquinaria nova	Preu (€)
Motors propulsors	230000
Reductores	446437
Convertidors de freqüència	600000
Generadors	2720000
Bateries	1500000
Sala de control	33500
Transformadors	140000
Motors de proa	95000
Total	5764937

Taula 25: Cost de la nova maquinaria

El cost total de la nova maquinaria és de 5.764.937€ aproximadament.

A tot això se li hauria de sumar el cost del nou espai per a les bateries amb el propi sistema de ventilació forçada. A més, el cost de la instal·lació elèctrica s'estima que és significativament superior que l'anterior.

A continuació es mostraran els preus de l'antiga maquinaria propulsora amb la següent taula:

Maquinaria antiga	Preu (€)
Motors propulsors	3437500
Auxiliars motor-alternador	1017937
Reductores	892874
Generador d'emergència	281750
Calderes	150250
Sala de control i transformadors	255000
Motors de proa	95000
Total	6130311

Taula 26: Cost de la maquinaria antiga

El cost total de l'antiga maquinaria és de 6.130.311€.

Un cop es saben els preus totals de cada sistema es poden comparar aproximadament ja que faltaria el cost de la instal·lació elèctrica i tots aquells elements que també són necessaris per al funcionament del sistema. Podem dir que el nou sistema propulsiu té un cost de 400.000€ menys respecte l'anterior.

El preu de les bateries augmenta el cost total del nou sistema mentre que els motors elèctrics juntament amb els nous generadors són menys costosos que els antics motors. Cal destacar l'elevat preu dels convertidors de freqüència ja que és superior que el dels propis motors elèctrics.

Conclusions

Durant el desenvolupament d'aquest treball s'ha observat que, la propulsió híbrida o elèctrica mitjançant l'ús de bateries, és una necessitat i un concepte que estan adoptant moltes empreses a l'hora dels dissenys de sistemes propulsius per a nous vaixells. Dins d'aquest concepte existeixen moltes variables on les diferents empreses com ABB, VEM Group, Wärtsilä i Ingeteam adopten les que creuen més convenientes, amb diferents punts de vista entre elles ja que encara no se sap del tot quines són les que major taxa qualitat-preu tenen.

Per a vaixells petits està clar que, l'ús de sistemes híbrids amb baixes tensions o inclús corrent continua, suposa un augment del rendiment molt considerable i una reducció del cost i el pes de la maquinaria, respecte l'alta tensió, notable. El principal problema es troba per a vaixells de dimensions més grans i on el consum de potències és proporcionalment més elevat. Aquest tipus de vaixells que consumeixen grans quantitats d'electricitat necessiten plantes elèctriques amb alta tensió on l'ús de transformadors augmenta molt el pes i és necessari proporcionar un gran volum en bateries si realment es vol millorar el rendiment significativament.

Moltes vegades s'opta per l'anteriorment mencionat sistema COEOD que utilitza els "Shaft Generators" per carregar les bateries i moure els eixos dels propulsors en condicions de navegació elèctrica. Però aquest sistema no suposa tanta eficiència ja que l'ús de motors dièsel per moure, directament, les hèlix té significativament menys rendiment que quan s'utilitzen motors elèctrics.

Els motors elèctrics suposen un gran avantatge a l'hora de propulsar les hèlix. Són màquines que tenen un rendiment molt elevat durant quasi totes les revolucions a les que poden funcionar. Tenen la capacitat d'autoregular-se per tal de no consumir més corrent del que necessiten i també es poden sobrecarregar durant petits períodes de temps per oferir més velocitat que la nominal.

A tot això ajuden els convertidors de freqüència encarregats de regular les velocitats però que resulten ser els elements més dèbils del sistema amb més probabilitats de patir una fallada que qualsevol altre element i el seu preu és més elevat que el dels propis motors elèctrics.

Pel que fa a les bateries cal destacar que són un problema per a qualsevol sistema elèctric ja que suposen un cost i un preu bastant elevat. En aquest cas en concret són el segon element més car i més pesat seguit dels generadors i que, depenent de la durada de funcionament únicament elèctric que es vulgui donar, això pot seguir augmentant i inclús sobrepassar aquests.

També cal mencionar que és necessari, tecnològicament parlant, el fet de poder augmentar-les la vida ja que, normalment les de ió de liti que són les més utilitzades, tenen una vida no superior a 4000 cicles de càrrega i descàrrega que no supera els 10 anys de duració.

A part, perquè un sistema híbrid sigui del tot òptim i no contami ni a les grans ciutats on atrac a, els ports d'aquestes, han de tenir suficient capacitat elèctrica per subministrar potències suficientment elevades que permetin als vaixells seguir operant amb normalitat i carregar les bateries sense l'ús dels generadors de a bord.

El que si que està clar i és el factor més important d'aquests sistemes és que, l'ús de bateries per reduir el consum de combustible, s'està tornant un concepte molt important per a la reducció de la contaminació atmosfèrica.

Està demostrat que el consum de combustible es redueix significativament i que existeix la possibilitat de no consumir-ne durant els règims de navegació pròxims a port on les grans ciutats pateixen les majors concentracions de CO₂.

En resum, si aquests sistemes híbrids s'apliquessin a gran part dels vaixells es reduirien considerablement les concentracions de CO₂ en les grans ciutats. El principal problema és l'elevada inversió per part de les empreses navilieres i la necessitat de que els ports siguin capaços de suportar tals demandes de potència.

Bibliografia

Apunts

- [1] Joel Jurado. *Propulsors*. Facultat de Nàutica de Barcelona, 2019
- [2] Arantxa Llambrich. *Teoria del vaixell*. Facultat de Nàutica de Barcelona, 2018
- [3] Pau Casals. *Planta elèctrica del vaixell*. Facultat de Nàutica de Barcelona, 2018
- [4] Manuel Rodríguez. *Màquines navals*. Facultat de Nàutica de Barcelona, 2019
- [5] Manuel Rodríguez. *Equips navals*. Facultat de Nàutica de Barcelona, 2018

Llibres

- [1] Roberto Faure Benito. *Máquinas y accionamientos eléctricos*. Universitat de Madrid UPM, 2000
- [2] Enrique Casanova Rivas. *Máquinas para la propulsión de buques*. Universitat de Coruña, 2001
- [3] Juan Urrutia Nebreda i Jorge Vicario González. *Buque de crucero*. Treball de fi de grau, UPM, 2003
- [4] Jean-François Boudesseul. *Análisis hidrodinámico y de estabilidad de un buque petrolero*. Treball de fi de grau, Universitat de Bilbao, 2017
- [5] Víctor Canela Badrinas. *Desarrollo del sistema de propulsión diésel-eléctrico de un catamarán*. Treball de fi de grau, Facultat de Nàutica de Barcelona, 2018
- [6] Iván Peral Pérez. *Diseño de la Instalación Eléctrica de un Petrolero para Transporte de Crudo*. Treball, UPC, 2013
- [7] Juan Mayol Obrador. *Instalación eléctrica de un catamarán de 30 de eslora y pasaje*. Treball de fi de grau, Universitat de Cadis, 2010

Webs

- [1] *Bateria de io de liti*, Wikipedia
https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_ion_de_litio
- [2] *Màquines elèctriques*, VEM Group
<https://www.vem-group.com/>

- [3] *Màquines elèctriques*, ABB
<https://new.abb.com/es>
- [4] *Màquines elèctriques*, MAN
<https://marine.man-es.com/>
- [5] *Màquines elèctriques*, Ingeteam
<https://www.ingeteam.com/>
- [6] *Màquines elèctriques*, Wärtsilä
<https://www.wartsila.com/>
- [7] *Màquines elèctriques*, MarelliMotori
<http://www.marellimotori.com/>
- [8] *Itineraris de creuers*, Windstar Cruises
<https://www.windstarcruises.com/>
- [9] *Star Pride*, Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Star_Pride
- [10] *Le Lyrial*, Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Le_Lyrial
- [11] *Sistemes propulsius*, Google Sites
<https://sites.google.com/site/serviciosdelbuque/clases-de-servicios-en-diferentes-buques?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>
- [12] *Normatives*, DNV-GL
<https://www.dnvgl.com/>
- [13] *MS Color Hybird*, Híbridos y eléctricos
<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/barco-hibrido-mas-grande-mundo-necesita-baterias-50-tesla-model-s/20190805124428029458.html>
- [14] *MS Roald Amundsen*, Hosteltur
https://www.hosteltur.com/comunidad/nota/019291_ms-roald-amundsen-primer-buque-hibrido-de-hurtigruten-comienza-a-navegar.html

[15] *Emissions*, IMO

<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/M2%20EE%20regulations%20and%20guidelines%20final.pdf>

[16] *Emissions*, EMSA

<https://mrv.emsa.europa.eu/#public/emission-report>

[17] *Rutes marines*, Marine Traffic

<https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:2.174/centery:41.347/zoom:13>

Annexes

A.1 Fitxa tècnica Motor 2500 kW

MOTOR TYPE		B5V 500 LD6
RATED POWER	kW	2500
EFFICIENCY CLASS (IEC 600034-30-1)		-
DUTY		S1
RATED VOLTAGE	V	690 Δ
RATED FREQUENCY	Hz	60
RATED CURRENT	A	2555.6
RATED SPEED	rpm	1189
MOUNTING	IM	HORIZONTAL
EXECUTION		TEWAC
ATEX EXECUTION		-
PROTECTION DEGREE	IP	55
COOLING METHOD	IC	81W
MOMENT OF INERTIA [J=WD2/4]	kgm ²	79.6
AMBIENT TEMPERATURE	°C	45
SITE ALTITUDE		1000
CLASSIFICATION		DNV
INSULATION CLASS		F
TEMPERATURE RISE		F
APPLICABLE STANDARDS		IEC 60034

			LOAD		
			4/4	3/4	2/4
EFFICIENCY		%	96.3%	95.3%	93.2%
POWER FACTOR			0.85		
TORQUE	FULL LOAD	Nm	20078		
	LOCKED ROTOR (DOL)	p.u.	0.56		
	PULL-OUT (DOL)	p.u.	2.07		
LOCKED ROTOR CURRENT (DOL)		p.u.	5		
STARTING METHOD			FREQUENCY CONVERTER		
THERMAL PROTECTIONS	WINDINGS		3+3 PT100		
	BEARINGS		1+1 PT100		
HEATING ELEMENTS		V / W	230/600		

MECHANICAL DATA

BEARING TYPE	D-end		ROLLING
	N-end		ROLLING
LUBRICATION			GREASE
DIRECTION of ROTATION			CW or CCW
NO LOAD NOISE		dB(A)	88
WEIGHT		kg	5900
VIBRATION LEVEL			A
PAINTING			RAL 5010

A.2 Fitxa tècnica Motor proa

Fabricante

VEM motors GmbH
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 1

38855 WERNIGERODE
Deutschland

Motores trifásicos con rotor de jaula de ardilla, motores para uso marino Germanischer Lloyd (DNV GL)

Tipo	IE2-WE2R 355 L4 NS LL HW			
Potencia de diseño	(kW)	525		
Par de diseño	(Nm)	2795		
Modo de servicio		S1		
Clase IE	[-]	IE2-95,8%		
Efficiency determination	[-]	EN 60034-2-1		
Frecuencia de diseño	(Hz)	60		
Velocidad de diseño	(min ⁻¹)	1794		
Tensión	(V)	690		
Conexión	[-]	D	D	
Corriente	[A]	560.0	560.0	
Corriente inicial de arranque rel.	[-]	9		
Par de arranque rel.	[-]	1,3		
Par mínimo durante el arranque rel.	[-]	1		
Par de vuelco rel.	[-]	3,3		
Factor de potencia	[-]	0,83		
Estado de carga	[%]	100	75	50
Rendimiento	[%]	95,8	95,8	95,5
Cl. térm.		155(F)		
Temperatura del refrigerante	(°C)	45°C		
Altura de instalación	(m)	1000m		
Grado de protección IP		IP55		
Momento de inercia	(kgm ²)	10		
Masa	(kg)	2500		
Rodamiento DS		6324 C3		
Rodamiento NS		6317 C3		
Plazo de relubricación	(h)	3000		
Grasa		ASONIC GHY 72		
Cantidad de grasa	(g)	90/57		

Opciones

Forma constructiva	IM B3
Brida	-
Caja de bornes	Versión de uso marino
Posición de la caja de bornes	arriba
Racor atornillado para cables	Tapón
Posición de entrada de cables	derecha
Árbol	Estándar
Disposición de cojinetes	Dispositivo de relubricación, cojinetes ligeros
Información especial para la disposición de cojinetes	Rodamiento fijo lado N
	External earthing terminal on housing
Factor de calidad vibracional	Clase A
	Equilibrio con medio muelle de ajuste
Sistema de colores	02 world wide (KK C2-C3),RAL 7031 gris azulado
Condiciones de entrega y/o normativa oficial:	IEC / EN 60034-1

A.3 Fitxa tècnica Convertidor de freqüència 2880 kW

GENERAL DESCRIPTION

GENERAL DESCRIPTION	
• Drive Configuration:	AFE Rectifier + Inverter
• Rated Output Power ⁽¹⁾ :	2880 kW
• Grid Side Topology:	2 Level AFE (IGBTs)
• Motor Side Topology:	2 Level Inverter (IGBTs)
• Cooling System	Water

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS	
• Grid Side Voltage:	690 Vac ($\pm 10\%$)
• Grid Side Frequency:	50 / 60 Hz ($\pm 5\%$)
• Grid Side Rated Current:	2670 Aac
• Grid Side Power Factor (fundamental):	1
• Motor Side Rated Voltage:	690 Vac
• Motor Side Frequency Range ⁽²⁾ :	0 - 120 Hz
• Motor Side Rated Current	2853 Aac
• DV/dt at motor terminals ⁽³⁾ :	< 5 kV/ μ s
• Drive Efficiency (at rated operating point):	96.1%
• Drive Service ⁽⁴⁾ :	S1

AMBIENT CONDITIONS

AMBIENT CONDITIONS	
• Permissible Operation Ambient Temperature ⁽⁴⁾ :	0 °C to + 45 °C
• Permissible Storage and Transportation Temperature:	-20 °C to +55 °C
• Humidity (non-condensing):	5% to 95%
• Altitude ⁽⁴⁾ :	\leq 1000 m
• Noise Level (1m from cubicle line-up):	< 75 dB (A)

A.4 Fitxa tècnica Bateria 100 kW

Technical data	Compact ESM
Power	Up to 100 kW in one unit
Energy	Up to 65 kWh in one unit Up to 200 kWh in extended unit
Connection method	3-phase
AC voltage	208-690 Vac
Network frequency	50 Hz/60 Hz – +/- 5%
Efficiency	>96% (converter)
Reactive power compensation: target $\cos\Phi$	From 0.6 (inductive) to 0.6 (capacitive)
Harmonic mitigation	Up to 50th harmonic
Load balancing characteristics	Balance the currents between phases
Energy storage medium	Lithium ion battery modules
DC voltage range	<1200 Vdc
Cycle life	4000 cycles
Calendar life	10 years
Dimensions (W x D x H)	1800 x 600 x 2000 mm
Approximate weight	1100 kg
Enclosure protection degree	IP 21
Control options	Standard and advanced algorithms
Communication protocols	Modbus TCP/IP, IEC 61850, CAN, DNP 3.0 (optional)
Redundancy	Master/master or master/slave arrangement
Modularity	Maximum 32 ESM racks can be combined
Room ambient temperature	23°C is recommended
Humidity	60% non-condensing
Altitude	Indoor installation in clean environment up to 1000 m.a.s.l.
CT requirements	Only required for power quality features
Power converter	UL-508, IEC 60439-1, IEC 61000-6-2, IEC 61000-6-4
Batteries	UN 38.3

Perpendicular de popa

Centre XG

Perpendicular de proa

Lpp = 116,532 m
B = 22,350 m
T = 5,25 m
H = 25,400 m
D = 8147 T

CB = 0,598
CM = 0,983
CP = 0,579
CF = 0,825
XCC = 57,955 m

Perfil

Coberta 2

Coberta 1

Maquinaria nova

Sala de control i accessos nous

Sistema de combustible nou

Aleix Tarafa

Escala 1:300

**Escala
1:300**

The image displays three architectural drawings of a ship's hull and engine room layout, oriented horizontally.

Top Drawing: Hull Profile and Dimensions

- Perpendicular de popa** (Stern Perpendicular) is marked at the left end.
- Centre-X** is marked at the center.
- Perpendicular de proa** (Bow Perpendicular) is marked at the right end.
- Perfil** (Profile) is labeled on the right side.
- Dimensions:**
 - Lpp = 116,532 m
 - B = 22,350 m
 - T = 5,400 m
 - H = 25,400 m
 - D = 8615 T
 - CB = 0,598
 - CM = 0,983
 - CP = 0,579
 - CF = 0,825
 - XCC = 57,955 m

Middle Drawing: Coberta 2 (Deck 2)

- Shows the layout of the second deck.
- Key areas include: **Talleres de màquines** (Machine Workshops), **Planta de aigua dolça** (Fresh Water Plant), **Sala de control de màquines** (Machine Control Room), **Escalier** (Staircase), and **Oficina de màquines** (Machine Office).
- Markings include **MCI** (Main Centerline) and **MCI** (Main Centerline) at the bow and stern.

Bottom Drawing: Coberta 1 (Deck 1)

- Shows the layout of the first deck.
- Key areas include: **Tanques anti-escorça** (Anti-rust Tanks), **PURIFICADORS** (Purifiers), **Tanque de combustible 1** (Fuel Tank 1), **Tanque de combustible 2** (Fuel Tank 2), **Tanque de aigua dolça 2** (Fresh Water Tank 2), **Tanque de aigua dolça 3** (Fresh Water Tank 3), and **Tanque de aigua dolça 4** (Fresh Water Tank 4).
- Markings include **MCI** (Main Centerline) and **MCI** (Main Centerline) at the bow and stern.

Right Side Panel:

- Disposició de la sala de màquines** (Machine Room Layout)
- Plànols anteriors** (Previous Plans)
- Escala 1:300** (Scale 1:300)

**Escala
1:300**